

**Vysoká škola báňská - Technická univerzita
Ostrava**

**Fakulta strojní
Katedra mechanické technologie**

**Technické aspekty svařování
termoplastů laserem
Laser Welding of
Thermoplastics-Technical
Aspects**

Student: Bc. Martin Kepprt
Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladislav Ochodek

Ostrava 2014

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Kepprt**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Technické aspekty svařování termoplastů laserem**
Laser Welding of Thermoplastics-Technical Aspects

Zásady pro vypracování:

1. Proved'te studii vlastností a použití termoplastů v automobilovém průmyslu.
2. Proved'te studii technologie svařování termoplastů laserem.
3. Navrhněte a realizujte program ověření vybraných vlastností laserových svarů termoplastů.
4. Dosažené výsledky porovnejte s lit. prameny a proved'te diskusi.

Seznam doporučené odborné literatury:

ASM. Handbook vol. 6, *Welding, Brazing, Soldering*. ASM 2001.
LEGRAND, D., BENDLER, J.T. *Handbook of Polycarbonate Science and Technology (Plastics Engineering)*. Marcel Dekker Inc. 2000.
TOTTEN, G., INOUE, T., HOWES, M. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel* ASM International 2001.

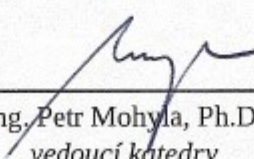
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladislav Ochodek**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014




Ing. Petr Mohyla, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 19.5.2014

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Martin Kepprt', written on a light-colored rectangular background.

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB -TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s právním užitím díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užití své díla – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě :19.5.2014



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Martin Kepprt

Adresa trvalého pobytu autora práce: Závěřická 438/1, 789 01 Zábřeh

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Kepprt, M. *Technické aspekty svařování termoplastů laserem*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie, 2014, 92 s. Vedoucí práce: Ochodek Vladislav.

Diplomová práce se zabývá transmisivním svařováním laserem vybraných termoplastů, konkrétně polykarbonátů. V teoretické části jsou popsány principy laserů použitelných pro tuto technologii, dále jednotlivé procesní varianty, popis zařízení pro svařování a v neposlední řadě i materiály použité pro praktickou část. Příprava a nastavení parametrů pro svařování jsou prováděny na zkušebních destičkách, které materiálově odpovídají svařovaným komponentům předního světlometu. Hlavní pozornost je věnována závislosti nastavení parametrů laserové svařovací diody na výsledné kvalitě a pevnosti sváru v závislosti na simulovaném zatížení.

Klíčová slova: Laser, svařování termoplastů laserem, polykarbonát, pevnost laserového spoje

ANNOTATION OF MASTER THESIS

Kepprt, M. The technical aspects of welding plastic parts by laser beam: Masters work. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, 2014, 92 p. Masters work leader: Ochodek, Vl.

This masters work deals with transmission laser welding of chosen plastic parts, specifically polycarbonates. In the theoretical part, the laser principles are described, which are used for this technology, furthermore process variants, description of the laser welding machine and finally materials for the practice part. Preparation and setting of parameters of welding are used by testing plates, which are from the same material as is used in the headlamps. The main focus is on the connection between setting the parameters and the final quality of the weld and on the influence of temperature.

Key words: Laser, laser welding of plastic parts, Polycarbonate, fastness of laser weld

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLU

Značka/Symbol	Význam	Jednotka
LED	světlo emitující dioda (Light Emitting Diode)	[-]
CO ₂	oxid uhličitý	[-]
Nd: YAG	označení pro pevnolátkový laser	[-]
3D	trojrozměrné zobrazení	[-]
CNC	číslicově řízený stroj (Computer Numeric Control)	[-]
PC	Polykarbonát	[-]
UV	ultrafialová (ultraviolet)	[-]
PLC	Power logic controller (programovatelný automat)	[-]

OBSAH

ÚVOD.....	9
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 PROCES SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ.....	11
1.1 Definice Svařování	11
1.2 Svařování plastů	11
2 Lasery pro svařování plastů	13
2.1 Základní princip laseru	13
2.2 Pevnolátkové ND-YAG lasery a jejich princip	16
2.3 Plynové CO ₂ lasery.....	17
2.4 Polovodičové lasery.....	19
2.5 Porovnání laserů	20
2.6 Základní požadavky na volbu laseru	21
2.7 Hlavní výhody laserového svařování	23
2.8 Propustné svařování (Transmission Welding).....	24
2.8.1 Obrysové svařování (Contour Welding).....	24
2.8.2 Simultánní svařování s více diodami (Simultaneous Welding)	25
2.8.3 Svařování s maskou (Mask Welding)	26
2.8.4 Hybridní svařování (Hybrid welding)	27
3 Robotizované pracoviště.....	28
3.1 Řízení svařovacího procesu	28
3.2 Popis pracoviště.....	29
3.3 Svařovací robot.....	29
3.4 Sestava laseru	30
4 Použité materiály	33
4.1 Polykarbonát.....	33
4.2 Vlastnosti a jejich výroba	33
4.3 Přípravné zpracování	34
4.3.1 Mísení plastu s ostatními přísadami – Technologie míchání.....	34
4.3.2 Probarvování plastu – Technologie hnětení.....	34
4.3.3 Granulování plastu – Technologie granulace	35
4.3.4 Doprava a sušení	35
4.4 Způsoby zpracování.....	37
5 Zkušební vzorky	38
5.1 Příprava zkušebních těles	38
5.2 Popis a rozměry zkušebních vzorků	39
5.3 Příprava zkušebních vzorků	40
5.3.1 Příprava vzorků pro vizuální kontrolu	40
5.3.2 Příprava vzorků pro trhací zkoušku	41
5.3.2.1 Zatížení vzorků pro trhací zkoušku.....	43
5.3.2.2 Vliv krátkodobé tepelné zátěže	44
5.3.2.3 Vliv dlouhodobé tepelné zátěže	45
5.3.2.4 Zatížení kondenzační vodou - Sauna test.....	45
6 VADY SVAROVÝCH SPOJŮ	47
6.1 Typy vad svarových spojů.....	47
6.2 Zkušební metody svarových spojů	47
6.3 Vizuální kontrola svaru	48
6.3.1 Vady hodnocené při vizuální zkoušce	49

6.4	Trhací zkouška.....	51
6.4.1	Průběh zkoušky.....	51
6.4.2	Rozměry zkušebních těles	52
6.4.3	Upnutí těles pro zkoušku	53
6.4.4	Parametry zkoušky na smyk	54
6.4.5	Zařízení pro zkoušení pevnosti svaru	54
6.5	Trhací zkouška za zvýšené teploty	55
6.6	Průběh zkoušky	55
7	VÝSLEDKY	58
7.1	Výsledky vizuální kontroly svarů.....	58
7.1.1	Výsledky vizuální kontroly pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý.....	58
7.1.2	Výsledky vizuální kontroly pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 černý	68
7.2	Výsledky zkoušky smykem	78
7.3	Výsledky zkoušky za zvýšené teploty	82
8	Závěr	87
	SEZNAM LITERATURY	90

ÚVOD

Technologie založené na principu laseru nabízejí nová progresivní řešení téměř v každé oblasti průmyslu. Díky svým přednostem, jako je např. přesnost, reprodukovatelnost, bezkontaktní aplikace, čisté zpracování, či použitelnost téměř všechny materiály, nalézá tato technologie stále širšího uplatnění [1].

Laserů se využívá zejména v obrábění a ve svařování, což jsou technologie založené na využití schopnosti výkonných laserů koncentrovat energii optického záření v prostoru, čase i spektrálním intervalu a na interakci záření s látkou[2].

Při jednotlivých operacích je nutné správně nastavit parametry laserové jednotky, jako je např. výkon, frekvence a rychlost posuvu zařízení emitující paprsek. [1]. I přes vysokou cenu výkonových laserů si tato technologie razí stále rychleji cestu k průmyslovému využití. Jejich efektivita je tak vysoká, že zajišťuje návratnost vložených investic za poměrně krátkou dobu [2].

V současnosti jsou technologická zařízení pro svařování laserem pořizována společnostmi, které je využívají pro přesně danou aplikaci a vývoj nových technologií využívajících tohoto principu[1]. Hlavním představitelem tohoto využití je zejména automobilový, elektrotechnický průmysl a zdravotnictví.

Využití laserů v automobilovém průmyslu není jen pro účely výroby karoserií, jak by se zdálo, ale také pro výrobu světlometů, které jsou nedílnou součástí všech typů vozidel. Každý výrobce se však snaží odlišit vzhled svých produktů od produktů konkurence, což s sebou mnohdy nese zcela nová řešení v pojetí konstrukce dílů a způsobu montáže. Připočteme-li technickou náročnost nových zdrojů světla v podobě LED diod a využití laseru i pro osvětlení, pak dostáváme sestavu komponentů, u kterých je nutné řešit jednu z hlavních otázek, a to bezpečné a spolehlivé spojení jednotlivých dílů při zachování kompaktních rozměrů a to vše bez viditelných spojů. Technologie spojování zahrnuje řadu metod, a jednou z nich je právě metoda transmisivního laserového svařování [8].

Protože v současnosti je materiálová skladba světlometu v automobilu tvořena převážně plastovými díly, tato diplomová práce je zaměřena na vytvoření pevného spoje laserovou technologií mezi polykarbonátovými komponentami světlometu. Transparentní čelní skla a rámečky uvnitř světlometu jsou řešena právě polykarbonáty s rozdílnou tepelnou odolností a vytvoření spolehlivého spoje dílců při montáži je jedním z pilířů dlouhodobé spolehlivosti světlometu.

I TEORETICKÁ ČÁST

1 PROCES SVAŘOVÁNÍ PLASTŮ

1.1 Definice Svařování

Svařování je proces, který slouží k vytvoření trvalého, nerozebíratelného spoje dvou a více materiálů. Obecným požadavkem na proces svařování je vytvoření takových termodynamických podmínek, při kterých je umožněn vznik nových meziatomárních vazeb.

Protože prakticky je velmi obtížné dosáhnout spojení na úrovni meziatomových vazeb za okolních podmínek (běžná teplota, tlak), kdy je termodynamický stav materiálů stabilní, resp. metastabilní, je nutné tento termodynamický stav změnit. Proto je při svařování nutné působit buď tlakem, teplem, nebo oběma faktory najednou. Obecně platí závislost, čím vyšší působí tlak, tím méně je potřeba vnést tepla a naopak. Tlakové svařování je označením svařování za působení převážně tlaku a tepla.

Svařovat lze kovové i nekovové materiály, materiály podobných i různých vlastností, ale pro různé typy spojů a materiálů jsou vhodné jiné metody svařování. Při svařování dochází ke změně fyzikálních nebo mechanických vlastností základního materiálu v okolí spoje [3].

1.2 Svařování plastů

Svařování plastů je technologie spojování dílů z plastů za použití tepla nebo tlaku s přídavným materiálem, nebo bez něho, přičemž se ve svařovací zóně spojovaných ploch nachází materiál ve viskózně-tekutém stavu. Svařování plastů se dá použít pouze pro termoplasty, které se dají přivedeným teplem převést do plastického stavu. Reaktoplasty nelze svařet, protože po zpracování jsou dále již netavitelné a tudíž je nelze převést do plastického stavu. Výhodné jsou zejména termoplasty s širokou oblastí viskózního stavu (horní a spodní teplotou teploty tání, resp. teploty viskózního toku) a termoplasty se strmým přechodem. Např. PA (Polyamidy) jsou pro svařování méně vhodné. Ještě větší

opatrnosti je nutné dbát u termoplastů náchylných k oxidaci za vyšších teplot, jako např. POM (Polyoxymethylen).

Při použití dvou odlišných druhů plastů, nebo např. u plněných plastů, a to jak u základního materiálu, tak i mezi přídavným a základním materiálem, je potřeba uvažovat s výrazným poklesem pevnosti svarového spoje. Tyto svarové spoje většinou nesplňují náročné podmínky kladené na jejich pevnost a mohou být určeny pro podřadnější účely [5].

Tabulka1. Svařitelnost materiálů (*X* – zaručená svařitelnost, *O* – podmíněná svařitelnost)[20]

		Teile-Werkstoff Durchstrahlkomponente Parts material laser-transparent component part																	
		PMMA	ABS	MABS	PC	PC-ABS	PC-PBT	PC-HT	PA 6 unverstärkt PA 6 non-reinforced	PA 6-GF	PA 66 unverstärkt PA 66 non-reinforced	PA 66-GF	PA 66-M	PP unverstärkt PP non-reinforced	PP-GF	POM	PBT unverstärkt PBT non-reinforced	PBT-GF	PPA
Teile-Werkstoff Aufstrahlkomponente Parts material absorbing component	PMMA	X	X	X	X	X	X	X											
	ABS	X	X	X	X	X	X	X											
	MABS	X	X	X	X	X	X	O											
	PC	X	X	X	X	X	X	X									O	O	
	PC-ABS	X	X	X	X	X	X	X									O	O	
	PC-PBT	X	X	X	X	X	X	X									O	O	
	PC-HT	X	X	O	X	X	X	X									O	O	
	PA 6 unverstärkt PA 6 non-reinforced								X	O	O	O							O
	PA 6-GF								X	X	O	O							O
	PA 66 unverstärkt PA 66 non-reinforced								X	X	X	X							O
	PA 66-GF								X	X	X	X							O
	PA 66-M								O	O	O	O							O
	PP unverstärkt PP non-reinforced													X	X				
	PP-GF													X	X				
	POM															X			
	PBT unverstärkt PBT non-reinforced					O	O	O	O									O	O
	PBT-GF					O	O	O	O									O	O
PPA									O	O	O	O						X	

x = gut schweißbar

x = very suitable for welding

O = bedingt schweißbar

O = conditionally suitable for welding

Jednotlivé technologie svařování se liší podle způsobu předání tepla, potřebného k ohřátí, respektive k roztavení povrchů spojovaných součástí. Teplo může být předáno buď přímo (např. přímý kontakt s nosiči tepla, kontakt s horkým plynem) nebo přeměnou jiných druhů energie na teplo (např. přeměna mechanické nebo elektrické

energie na teplo). Vlastní způsob provedení svarového spoje se také liší z hlediska postupu provedených operací během jednotlivých technologií svařování, který může být následující [4]:

- Svařované povrchy jsou nejprve uvedeny ve vzájemný kontakt a teprve poté jsou zahřívány
- Svařované povrchy jsou nejdříve zahřívány a potom jsou uvedeny ve vzájemný kontakt
- Svařované povrchy jsou současně ve vzájemném kontaktu a současně se i zahřívají

2 Lasery pro svařování plastů

2.1 Základní princip laseru

Slovo **LASER** je zkratka pro „zesilování světla stimulovanou emisí záření“ z anglického *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. [18]

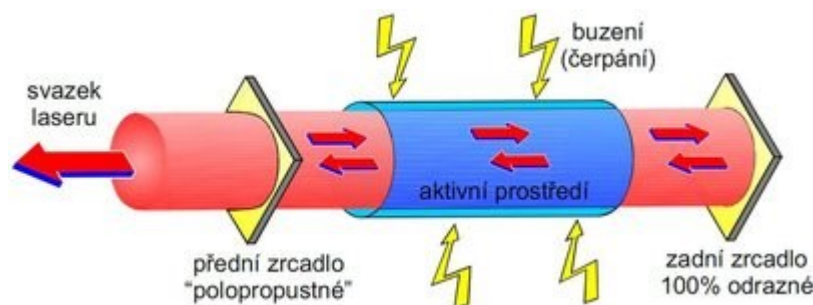
To, co dělá laserový svazek unikátním je především to, že při procesu stimulované emise má dopadající a emitovaný foton stejnou energii (frekvenci), stejný směr, polarizaci a fázi. Z toho plynou základní tři vlastnosti laseru, kterými se odlišuje od jiných zdrojů záření. Laser je:

1. Kolimovaný (tj. nerozbíhá se)
2. Monochromatický („jednobarevný“, tj. generované fotony mají stejnou frekvenci resp. vlnovou délku)
3. Koherentní (generované fotony jsou tzv. ve fázi jak časové tak prostorové)

Opakem je např. klasická žárovka, která generuje záření zcela „chaoticky“ a generuje fotony rozbíhající se do všech směrů a různých vlnových délek.

Právě díky těmto vlastnostem se stal paprsek laseru tak oblíbeným v mnoha různých průmyslových aplikacích. U průmyslových aplikací se využívá zejména možnosti fokusace svazku laseru do malého bodu a tím možnosti dosažení vysoké plošné hustoty energie [18].

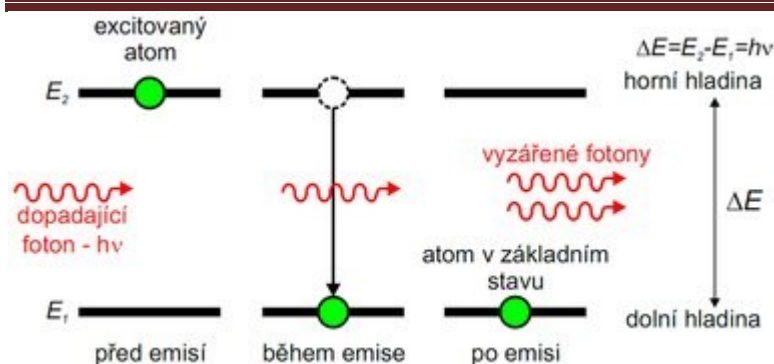
Obecné schéma laseru je zobrazeno na obrázku 1., kde základem laseru je aktivní prostředí, které je buzeno (opticky, elektricky apod.). Buzením je laseru dodána energie, která je pomocí procesu stimulované emise vyzářena v podobě laserového svazku. K tomu je potřeba ještě vytvořit tzv. optický rezonátor, který je nejčastěji tvořen odraznými zrcadly [18].



Obrázek 1. Obecné schéma laseru[18]

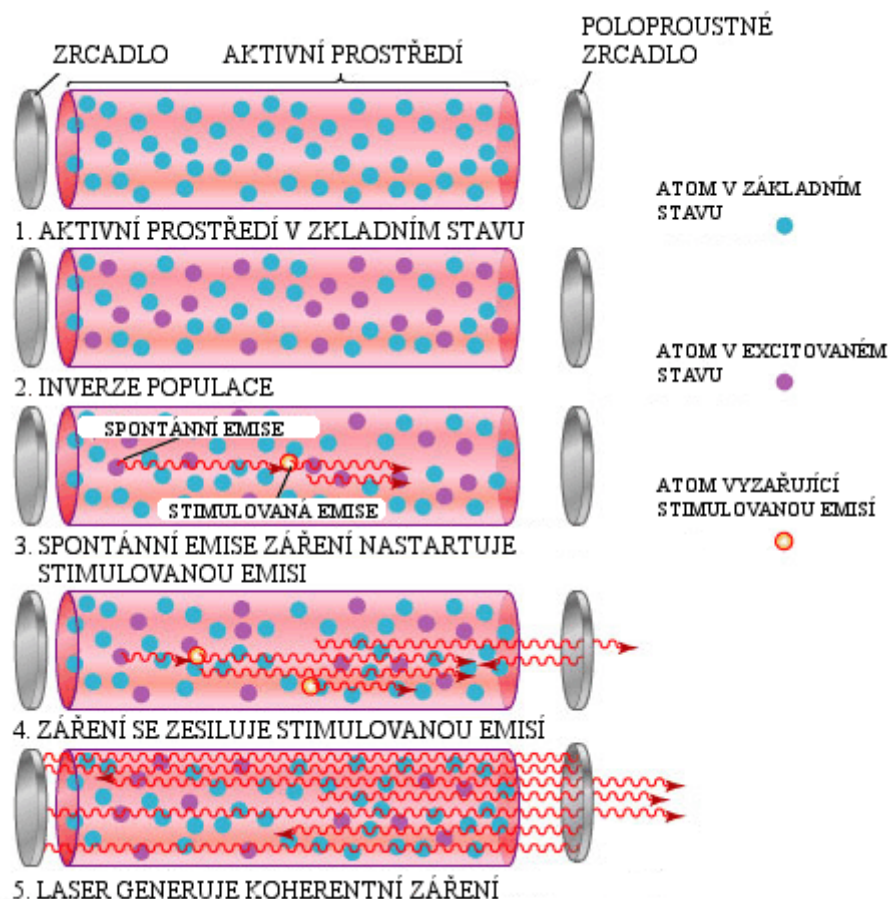
Obecně lze říci, že aktivní prostředí vždy obsahuje element, který se může nacházet v základním stavu s nižší energií nebo v excitovaném (vybuzeném) stavu s vyšším stupněm energie. Při přechodu z vyššího do nižšího energetického stavu tento element vyzáří foton. Tento zářivý přechod se děje spontánně sám od sebe a prostředí má vždy snahu být ve stavu s co nejnižším stavem energie – ve stavu termodynamické rovnováhy. Právě díky buzení se tento stav poruší a převede aktivní prostředí do excitovaného stavu, kdy je většina elementů ve stavu s vyšší energií. [18]

Energii dodanou aktivnímu prostředí lze přeměnit na laserový svazek (proud fotonů) pomocí procesu stimulované emise, který je zobrazen na obrázku 2. Jedná se v podstatě o lavinovitý efekt, kdy foton dopadající na excitovaný atom způsobí (stimuluje) jeho přechod z horní na dolní energetickou hladinu a při tom dojde k emisi dalšího fotonu [18].



Obrázek 2. Proces stimulované emise [18]

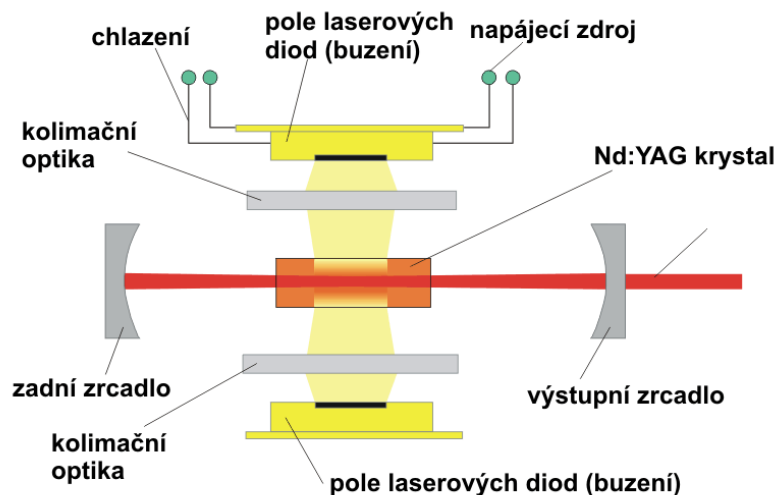
Při emisi fotony putují rezonátorem od jednoho zrcadla k druhému a jejich počet rapidně narůstá. Současně dochází k lavinovitému efektu a uvolnění energie v podobě proudu fotonů (svazek laseru) znázorněného na obrázku 3.



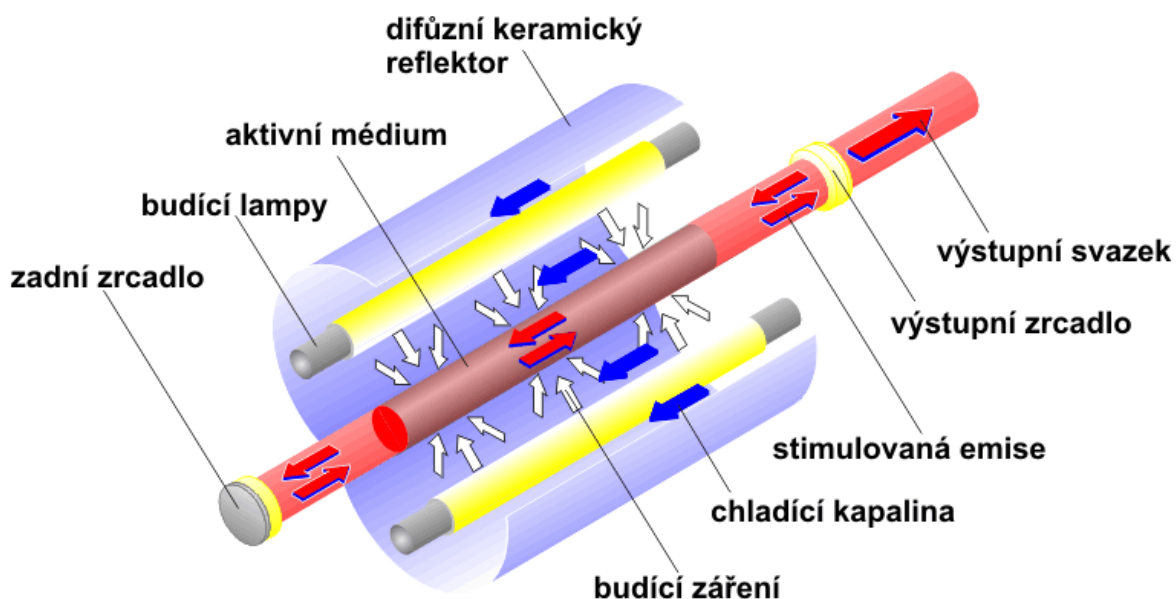
Obrázek 3. Uvolnění energie v podobě proudu fotonů [18]

2.2 Pevnolátkové ND-YAG lasery a jejich princip

Nd:YAG Laser, který je nejdéle používaným typem laseru v průmyslu se vyznačuje s aktivním prostředím izotropního krystalu Yttrium Aluminium Granátu ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) dopovaného ionty neodymu (Nd^{3+}) a zformovaného do podoby válečku. Vlnová délka vyzařovaného záření je přibližně 1064nm. Do aktivního prostředí krystalu je čerpána buď světelná energie z diod (označení DPSS – přičemž účinnost čerpání je 40-60 %) nebo výbojky (označení LPSS- účinnost čerpání 10 %), čerpání je možné přivádět do základny válce (lepší kvalita svazku) nebo do jeho pláště (vyšší výkon). Při čerpání základny válce je světlo přiváděno často optickým vláknem ze separátního zdroje buzení, v opačném případě je zdroj buzení i aktivní prostředí jako jeden celek [22].



Obrázek 4. Princip Nd:YAG laseru - světelná energie čerpaná z diod (označení **DPSS**)



Obrázek 5. Princip Nd:YAG laseru - světelná energie čerpaná z výbojek (označení LPSS)

Výhody Nd:YAG laserů:

- možnost vedení světla od zdroje k technologické hlavě prostřednictvím optického vlákna, což dovoluje jednoduchou integraci hlavy, a to i např. na robotické rameno

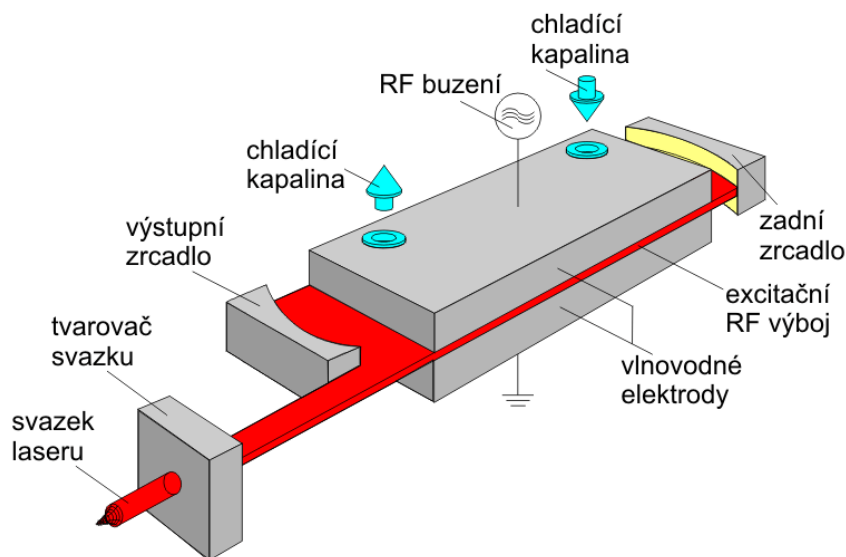
Nevýhody Nd:YAG laserů:

- vyšší pořizovací cena vztaženo k hodnotě výkonu
- špatná efektivita (vysoký příkon a nutnost chlazení)
- nízká životnost (do deseti tisíc hodin)

2.3 Plynové CO₂ lasery

Aktivní prostředí CO₂ laserů je tvořeno směsí plynů. Toto prostředí bývá buzeno ve většině případů elektrickou energií (přímo vstup elektrického proudu do plynu nebo se budí např. radiovými impulsy). Plyny aktivního prostředí mohou být buď statické, nebo proudit, přičemž dosahují vyšší efektivy (někdy až dvojnásobku). Při využívání laseru se mění koncentrace plynu a zhoršují se vlastnosti, po určité době používání je tedy potřeba plyn vyměnit [22]. Aktivní prostředí tvoří oxid uhličitý (CO₂) - 10–20 %, vodík (H₂)

a/nebo xenon (Xe) - pouze několik procent; obvykle používaný jen v zatavené trubici, Helium (He) - zbytek směsi plynu. Vzájemné poměry těchto prvků se mohou u jednotlivých CO₂ laserů lišit. Ke stimulované emisi dochází pouze v molekulách CO₂, ostatní plyny zlepšují podmínky vzniku inverzní populace [21].



Obrázek 6. Princip Nd:YAG laseru - světelná energie čerpaná z výbojek (označení LPSS)

Výhody CO₂ laserů:

- nízké pořizovací náklady vztažené k jednotce výkonu
- existence CO₂ laserů o značně vysokých výkonech (až desítky kW)
- dlouhá životnost (při pravidelném doplňování plynu až několik desítek tisíc hodin)

Nevýhody CO₂ laserů:

- vysoká vlnová délka, a tedy nízká absorpce v kovových materiálech, která musí být kompenzována vyšším výkonem (při využití vyššího výkonu dochází k rychlejšímu a vyššímu ohřevu materiálu, přičemž se stoupající teplotou dochází i k navýšení absorpce)
- vzhledem ke svojí vysoké vlnové délce záření neprojde optickým vláknem a musí být do místa svaru vedeno soustavou zrcadel (některé průmyslové roboty jsou již připraveny na osazení CO₂ laserem – do jejich dutého ramene, resp. do kloubů

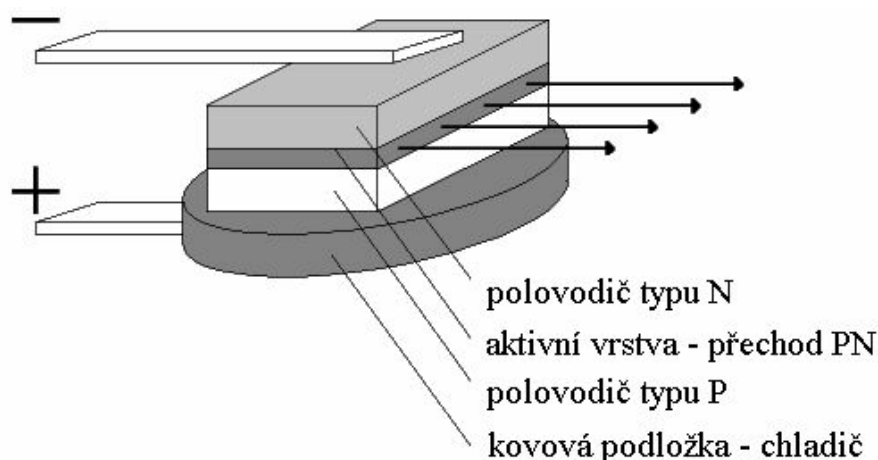
uvnitř ramene, lze umístit odrazivá zrcadla, která vedou paprsek od zdroje až k hlavě), která vyžadují údržbu v podobě čištění.

- vyšší provozní náklady spojené s nízkou efektivitou a nutným chlazením systému či s nutností udržování optiky pro vedení paprsku
- špatná kvalita svazku ovlivňující kvalitu zaostření stopy [27,28]

2.4 Polovodičové lasery

Polovodičové lasery, obecně nazývány jako laserová dioda, jsou dnes vůbec nejrozšířenější lasery. Nepracují s přechodem elektronů mezi diskrétními hladinami a tím se podstatně liší od ostatních typů laserů. Používají princip přechodu mezi valenčním a elektronovým pásmem polovodiče. Polovodičové lasery se vyznačují kompaktními rozměry, což s sebou nese nevýhodu v podobě větší divergence svazku na výstupu v porovnání s ostatními typy laserů. Dalším charakteristickou vlastností je změna výkonu v závislosti na teplotě.

Emitovaný svazek polovodičového laseru je snadno modulovatelný změnou budicího elektrického proudu. Polovodičové lasery se vyznačují vysokou účinností (až 50%), pracují jak v kontinuálním, tak v pulzním režimu a mohou dosahovat relativně vysokých výstupních výkonů při velmi kompaktním uspořádání. Uplatnění našly tyto lasery především v telekomunikacích a ve výpočetní technice.



Obrázek 7. Struktura laserové diody

2.5 Porovnání laserů

V tabulce 2 je porovnání 3 nejpoužívanějších typů laserů dle jejich vlastností. Základním rozdílem je vlnová délka emitovaného záření. Zatím co u pevnolátkového a diodového laseru je emitováno záření blízké infračervenému, tj. 1,064 μm , příp. 0,8 – 1 μm , u plynového je hodnota vlnové délky v řádech násobků v jiné oblasti a to 10,6 μm . Tento rozdíl se projevuje odlišnou absorpcí paprsku ve svařovaném materiálu. Dalším velkým rozdílem je účinnost generování paprsku. Zatímco u pevnolátkového chlazení odvede až 97% přivedené energie v podobě dále nezužítovatelného tepla, u polovodičových laserů se tato hodnota pohybuje kolem 30-50%. Co se týče porovnání velikosti stopy, kterou vytvoří paprsek na povrchu exponovaného materiálu, jasně vede pevnolátkový laser s hodnotami v řádech jednotek μm , následován plynovým laserem. V tomto pohledu je polovodičový laser o několik tříd horší, hodnota stopy je v řádech desetin mm, což však pro svařování termoplastů není rozhodně překážkou.

Tabulka 2: Porovnání laserů na svařování plastů[6]

Vlastnosti	Nd:YAG	Diodový	CO ₂
Vlnová délka [nm]	1064	780 - 980	10 600
Účinnost [%]	1.3	30 - 50	5.10
Střední výstupní výkon [kW]	Do 3	Do 2	Do 30
Kvalita svazku (možnost fokusace)	Vysoká	Nízká	Vysoká
Působení na plast	Ohřev objemu pro tloušťky 0,1-10 mm	Ohřev objemu pro tloušťky 0,1-10 mm	Ohřev povrchu do tloušťky < 0,5 mm

2.6 Základní požadavky na volbu laseru

Na laserový systém vhodný pro zmiňované technologické aplikace je kladeno několik základních požadavků, od kterých se odvíjí následná volba konkrétního laseru.

A) Výkon laserového záření

Z hlediska technologických aplikací je rozhodující především optický výkon laseru. Předpokládá se, že jeho hodnota by měla ležet mezi 1 až 30 kW středního výkonu v kontinuálním režimu.

B) Vlnová délka záření

Vlnová délka laserového záření je v přímém vztahu s přesností např. u laserového obrábění. Čím je kratší vlnová délka, tím vyšší přesnosti lze dosáhnout, přičemž tato přesnost je přímo úměrná kvadrátu vlnové délky. Je tedy zřejmé, že je snaha používat lasery s co nejkratší vlnovou délkou emitovaného záření.

C) Divergence laserového svazku

Divergence, neboli rozbíhavost laserového svazku ovlivňuje to, jak dobře lze laserový paprsek fokusovat optickým systémem. Kvalitní, tzv. jednomódové laserové záření lze fokusovat do bodu srovnatelného s vlnovou délkou záření, zatímco u mnohamódových svazků je při použití stejné optiky minimální rozměr bodu mnohonásobně větší. Ze stejných důvodů jako u vlnové délky, je snaha používat laser s co nejmenší divergencí svazku.

D) Možnost přenosu záření optickým vláknem

Velkou výhodou laserového systému je, pokud lze jeho záření na místo aplikace dopravit prostřednictvím optického vlákna. Zvyšuje se tím mnohonásobně flexibilita takového laseru a velmi se rozšiřuje obor možných aplikací.

E) Mobilita

Rozměry, hmotnost laseru a jeho energetická náročnost by měly umožnit jeho snadnou transportovatelnost do místa určení.

F) Provozní náklady

Náklady na pořízení, provoz (spotřeba energie, chladicích kapalin a pomocných náplní), údržba (servis a výměna opotřebovaných dílů) a inovaci laserového zařízení by měly být zcela logicky co nejnižší.

G) Účinnost laserového systému

Prvním z ekonomických hledisek použitelnosti laseru v průmyslových aplikacích hned vedle jeho pořizovací ceny a nákladů na údržbu je jeho účinnost. Primárním zdrojem energie většinou bývá elektrický proud a tak je snaha používat lasery, které mají vysoký poměr elektrického napájecího výkonu k výkonu užitečného laserového záření. Předpokládá se, že rozumné minimum je přibližně 20%.

H) Spolehlivost a stabilita laseru

Nezbytnou podmínkou pro průmyslové nasazení laseru je jeho vysoká spolehlivost a odolnost vůči vnějším vlivům, jako jsou otřesy, prach, vlhkost a změny teplot. Laser musí pracovat spolehlivě v širokém rozsahu pracovních podmínek a v případě poruchy musí být bezpečně odstaven.

I) Ekologické a bezpečnostní faktory

Moderní průmyslové zařízení musí splňovat mnoho bezpečnostních a ekologických kritérií. Lasery obecně přispívají ke zlepšení ekologických podmínek provozu, na druhou stranu je ale laserové záření v mnoha případech značně nebezpečné lidskému zdraví, především zraku [2].

2.7 Hlavní výhody laserového svařování

Z hlediska materiálově-technologického mezi hlavní výhody laserového svařování patří:

- Nízká tepelná degradace spojovaných materiálů (vysoká koncentrace tepelné energie)
- Absence přídavného materiálu
- Bezkontaktní proces (absence kmitů svařovaných součástí)
- Možnost citlivé regulace procesních parametrů
- Vysoká produktivita procesu
- Využití pro extrémně náročné aplikace (tenkostěnné součásti, velmi vysoká rychlost procesu)
- Vysoká jakost spoje
- Ekonomické výhody (nízké finanční náklady na běžný metr svaru, minimální náklady na údržbu zařízení)

V současné době se pro svařování nejvíce prosazují diodové a vláknové lasery s vlnovými délkami v rozsahu 810 – 980 nm.

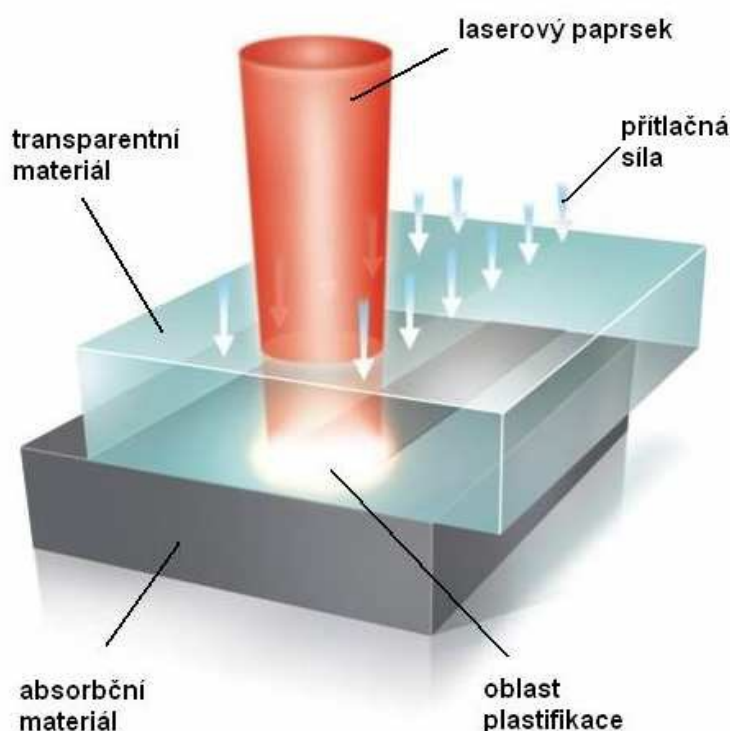
Pro průmyslové aplikace laserového svařování termoplastů jsou využívány relativně nízké výkony laseru představující cca 100-300 W.cm⁻². Uspořádání svařovaných součástí je závislé na konstrukčních technologických a materiálových faktorech.

V průmyslovém použití laserového svařování termoplastů se velmi často využívá:

1. uspořádání svařovaných součástí shodných nebo podobných absorpcí použitého laserového záření
2. uspořádání svařovaných součástí, při kterém je jeden termoplast pro záření laseru transparentní a druhý termoplast laserový paprsek naopak významně absorbuje. Velikost absorpce laserového paprsku termoplastem je možné modifikovat např. použitím vhodných příměsí termoplastu, mechanickou či chemickou úpravou povrchu apod. [7].

2.8 Propustné svařování (Transmission Welding)

Transmisivním (propustným) svařováním rozumíme svařování materiálů, zejména termoplastů, které mají rozdílné absorpční vlastnosti. Princip spočívá v průniku paprsku laseru přes transparentní materiál a v materiálu absorpčním se přemění na teplo, což při dostatečném přitlaku obou součástí umožní vznik svaru (obr. 8). Teplo vzniklé při absorpci paprsku do materiálu je pomocí tepelné vodivosti přeneseno do transparentní součásti a tím se díky tepelné roztažnosti zvýší spojovací tlak [5].

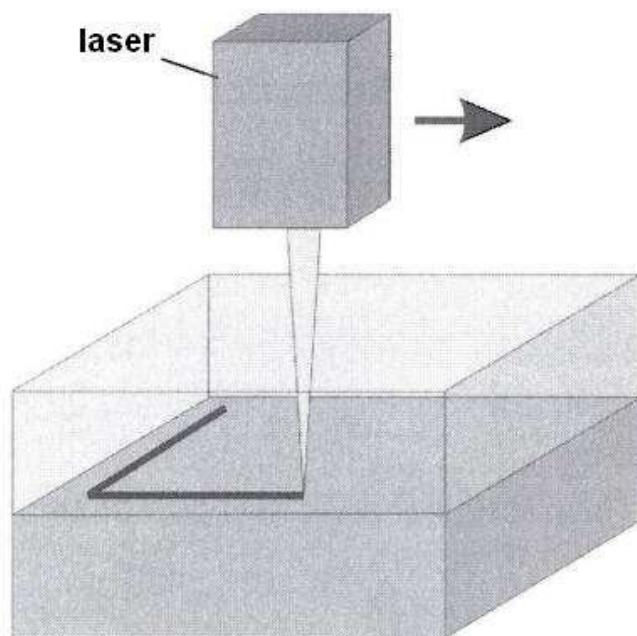


Obrázek 8. Princip transmisivního svařování[14]

2.8.1 Obrysové svařování (Contour Welding)

Obrysové (konturové) svařování (obr. 4) je založeno na principu kopírování kontury svařované součásti paprskem laseru. Rychlost posuvu paprsku, nebo hlavy laseru je dána výkonem laseru a svařovaným materiálem, každý materiál vyžaduje jiné množství energie vztažené na jednotku plochy. Posuv paprsku bývá zpravidla realizován vychylovacími zrcátky v hlavě stacionárního laseru, případně u laserů polovodičových

pohybem celé diody umístěné na manipulátoru. Základním předpokladem je dostatečný vzájemný přitlak obou materiálů [14].

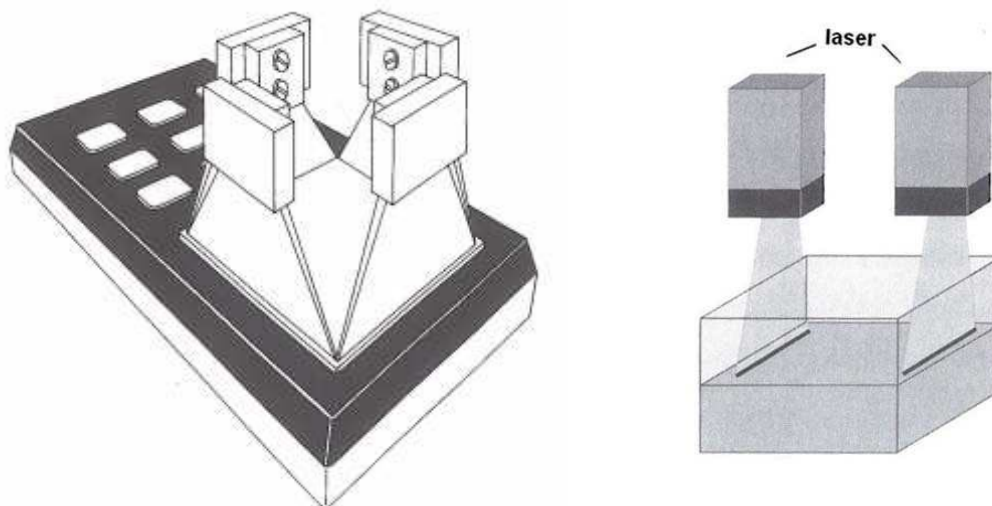


Obrázek 9. Obrysové (konturové) svařování[14]

Výhodou obrysového svařování při použití 6-ti osého manipulátoru může být svařena téměř libovolná 3D kontura, a to i části na špatně dostupných místech [5]. S úspěchem se této výhody používá při svařování zadních skupinových světlů automobilů, ale principiálně může být obrysové svařování použito i k opravnému svařování.

2.8.2 Simultánní svařování s více diodami (Simultaneous Welding)

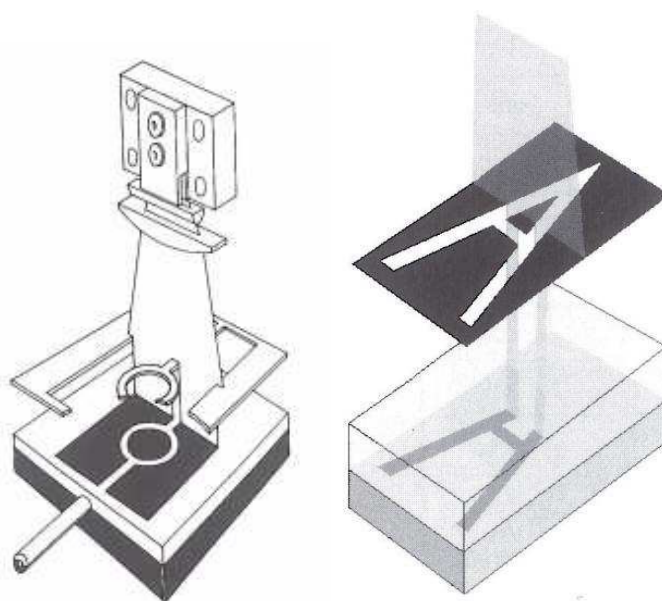
U simultánního svařování laserem je, na rozdíl od předešlé technologie celá svařovaná plocha stejnoměrně ohřata najednou. (obr. 10,11). Aby byly spojované části ozářeny stejnoměrně, je třeba použít k opsání kontury svaru vhodného uspořádání laserových diod. Laser nevykonává žádný relativní pohyb vůči povrchu svařované součásti [5]. Tento typ uspořádání je vhodný zejména pro velkosériovou výrobu, kde je možno dosahovat časů svařování již kolem 1s. Nevýhodou však je, že pro každý typ výrobku je třeba zhotovit novou hlavu s jiným uspořádáním diod, což je poměrně finančně náročné.



Obrázek 10, 11. Simultánní svařování [19,5]

2.8.3 Svařování s maskou (Mask Welding)

Svařování s maskou je dalším typem transmisivního svařování a jak již z názvu vypovídá, jedná se o jakési maskování oblasti, která svařena být nemá, nebo případně má být chráněna účinků laseru (obr. 7). Nespornou výhodou této technologie je možnost vytvoření složitých tvarů svaru v poměrně krátkém čase. Mezi nevýhody patří nutnost použití zdroje o vyšším nominálním výkonu.



Obrázek 12. Svařování s maskou [14]

2.8.4 Hybridní svařování (Hybrid welding)

Hybridní svařování je kombinace konvenčních technologií a to svařování laserem a použití halogenových lamp, čímž se docílí zvýšení dodané tepelné energie do svaru a umožní tak podstatně zvýšit rychlost svařování. Další výhodou je snížení zbytkových pnutí ve svaru. Hlavní využití nachází zejména v automobilovém průmyslu při svařování dílů vnějšího osvětlení a plastových komponentů motoru [24].

3 Robotizované pracoviště

Z důvodu ochrany zdraví pracovníků a zvláště z důvodu dodržení kvality výrobků je vhodným řešením tento proces automatizovat. Práce obsluhy spočívá v založení dílů do fixačních přípravků a po ukončení cyklu vyjmutí svařené skupiny. Díky využití manipulátoru je zajištěna vždy stejná poloha svaru a díky parametrizaci diody pomocí PLC systému je vždy zabezpečeno užití správných parametrů a dodržení správného postupu svařování, z důvodu minimalizace tzv. lidského faktoru.

Pro potřeby této diplomové práce bylo využito automatické svařovací zařízení zkonstruované a vyrobené ve společnosti HELLA AUTOTECHNIK NOVA s.r.o., dále jen HELLA. Výhodou tohoto zařízení je použití výměnných fixačních přípravků, což umožňuje velice rychlou změnu výroby spočívající pouze v jejich výměně. O volbu správného programu se stará samotné pracoviště, které dle identifikátoru, umístěném na přípravku vyhodnotí, která varianta přípravku je momentálně upnuta v zařízení a automaticky zvolí odpovídající program a sadu parametrů svařování.

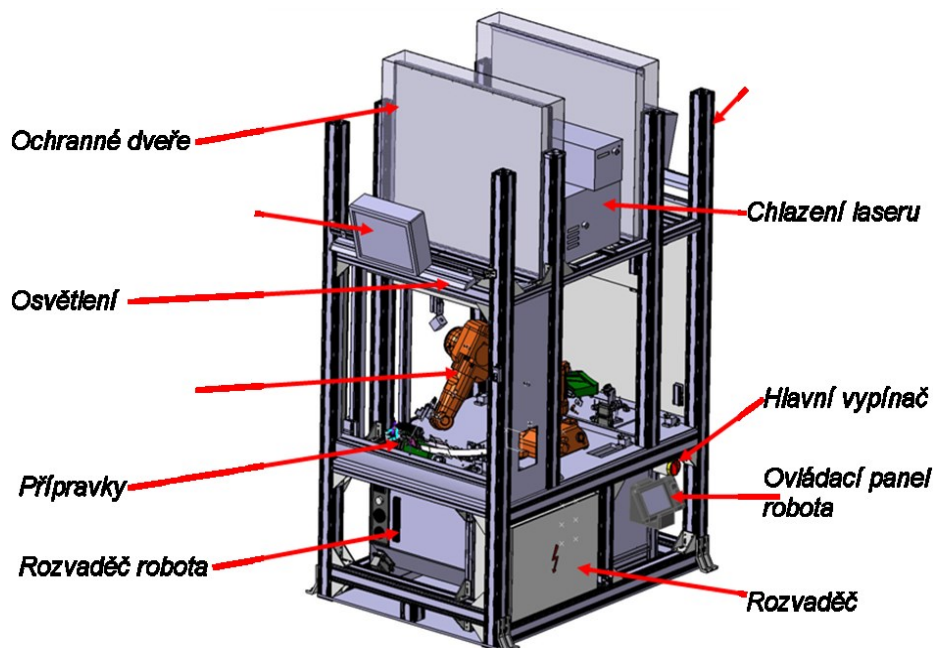
Pro zajištění ochrany zdraví obsluhy a dodržení přijatelných cyklů stroje je zařízení vybaveno dvojím zavíráním. První je umístěno uvnitř stroje tak, aby při svařování bezpečně oddělil prostor pro svařování a pro obsluhu, která ve stejném čase vkládá díly do přípravku, umístěného na druhé straně otočného stolu. Dveře vně stroje pak slouží jako ochrana při otáčení stolu, kdy se musí vnitřní dveře otevřít.

3.1 Řízení svařovacího procesu

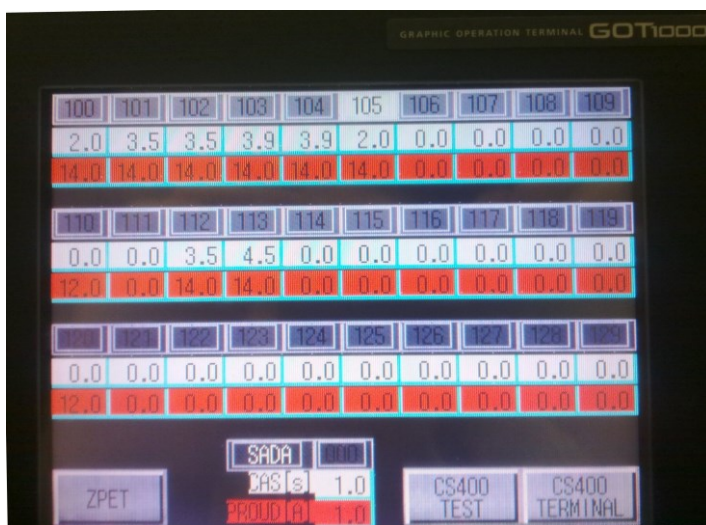
Proces svařování je řízen nadřazeným PLC systémem, jehož podřízenými prvky jsou ventilové bloky, které mají na starost distribuci stlačeného vzduchu pro pohyb akčních členů pneumatiky, dále pak manipulátor, který nese samotnou laserovou diodu, modul laseru, chlazení laseru a zobrazovací panel. Pro zjišťování stavu stroje, polohy dveří apod. jsou použity rozličné typy sensorů, které po sběrnici PROFIBUS komunikují s nadřazeným PLC.

Dioda emitující paprsek laseru je nesena manipulátorem, který se vždy před emitováním paprsku přesune do předem naprogramované polohy, což má za následek nejen správnou polohu výsledného svaru, ale i správnou vzdálenost diody od místa svaru.

3.2 Popis pracoviště



Obrázek 13. Schéma laserové svářečky[11]



Obrázek 14. Dotykový zobrazovací panel pro nastavování parametrů svařování

3.3 Svařovací robot

Pro svařovací aplikace se ve většině případů používají 6-ti osé manipulátory, při výrobě rozměrných, nebo tvarově složitých součástí i v kombinaci s polohovadlem, tzv. přídatnou sedmou, případně osmou osou. Tuto kombinaci můžeme často vidět např. při svařování karoserií automobilů. Kromě standardních univerzálních robotů s vedením kabeláže svářecího aparátu vně ramene robotu se uplatňují svařovací roboty s integrovanou

kabeláží uvnitř dutého ramene, což výrazně zvětšuje dosah a snižuje riziko zachycení kabeláže jinou součástí svářečí buňky nebo svařence. V případě této aplikace je nasnadě ještě další riziko a to možnost přepálení kabelu při svařování.

U tohoto zařízení byl použit konvenční manipulátor ABB IRB 1600 s řídicím systémem IRC 5. Jeho nespornou výhodou jsou kompaktní rozměry, vysoká přesnost a výborná opakovatelnost.

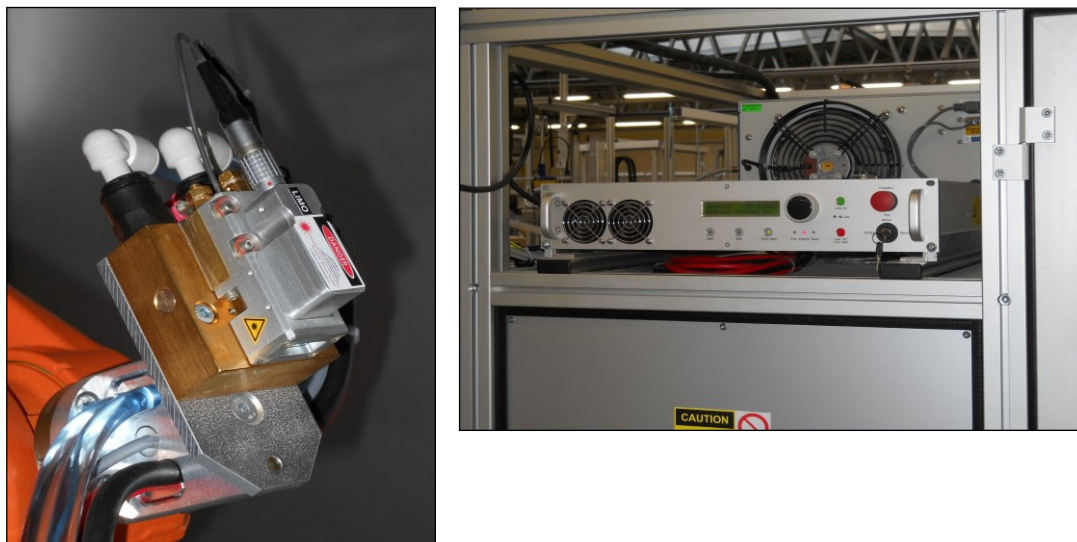


Obrázek 15. Pracovní prostor robota na jedné straně[11]

3.4 Sestava laseru

Sestava je tvořena samotnou polovodičovou diodou, emitující laserové záření, generátorem, chlazením a kabeláží at' už výkonové nebo řídicí části.

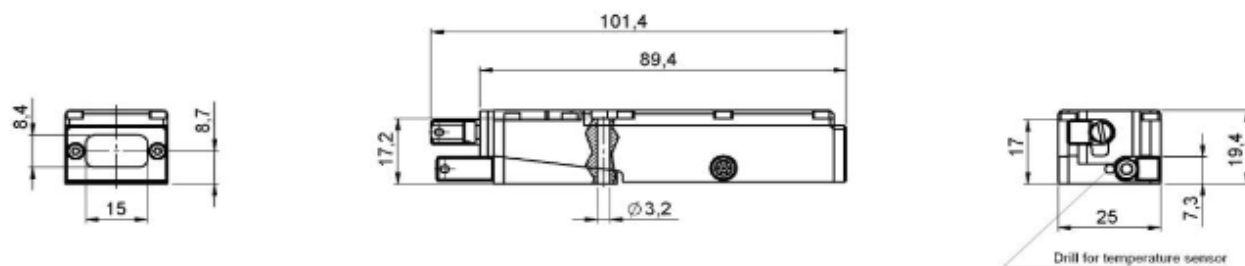
Mezi nesporné výhody této jednotky patří zejména její kompaktní rozměry, díky kterým ji lze zakomponovat téměř do každého stroje. Dále pak poměrně vysoká efektivita a mimo jiné poměrně příznivá cena v porovnání s ostatními srovnatelnými jednotkami na trhu. Z hlediska údržby lze za obrovskou výhodu považovat její modulární provedení, kdy v případě poruchy jednotky lze bez nutnosti asistence servisního technika vyměnit v poměrně krátkém čase jakoukoliv její část za jinou a pokračovat ve výrobě.



Obrázek 16. Laserová jednotka LIMO60-F400-SL980-101[11]

Tabulka 2: Parametry laserové diody

Veličina	Jednotka	Hodnota
Výstupní výkon	W	35
Velikost paprsku v ose x	mm	10
Velikost paprsku v ose y	mm	2,5
Střední vlnová délka	nm	980
Divergence paprsku v ose x	mrad	9
Divergence paprsku v ose y	mrad	14
Efektivita	%	45
Váha diody	kg	0,125



Obrázek 17. *Rozměry diody* [23]



Obrázek 18. Chladicí zařízení ThermoTek

4 Použité materiály

Při volbě materiálu je třeba vedle vlastností a ceny materiálu vzít v úvahu i jeho zpracovatelnost, která výrazně ovlivňuje mechanické a fyzikální vlastnosti konečného výrobku, ale i technologické podmínky. Vlastnosti a odolnost polymerů jsou v podstatě dány jejich chemickou a fyzikální strukturou, ale mohou být do značné míry ovlivněny i zpracovatelským procesem.

Mezi výhody plastových materiálů patří např. nízká měrná hmotnost, výborné zpracovatelské vlastnosti, jedná se o elektrické izolanty, mají výbornou korozní odolnost, tlumí rázy a chvění, atd. Nevýhodou jsou nízké mechanické a časově závislé vlastnosti, creep, ekologická zatížitelnost, apod. [25]

Z důvodu velké rozličnosti druhů plastových materiálů vyskytujících se ve světlometu bylo účelné se v rámci této práce zaměřit pouze na materiály, které jsou spojovány laserovou technologií. Ve všech případech se jedná o materiál polykarbonát, patřící do skupiny termoplastů.

4.1 Polykarbonát

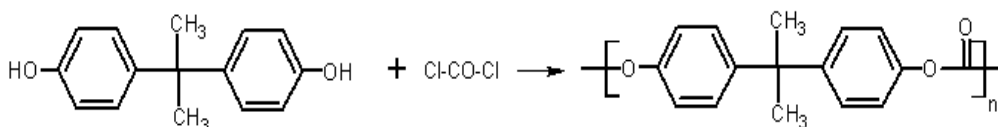
Polykarbonát je nekystalizující amorfní termoplast připravený fosgenací (reakce dianu s fosgenem, viz obr. 19) v alkalickém prostředí v přítomnosti rozpouštědla. Získaný polymer má relativní molekulovou hmotnost 25 000 až 70 000. Polymery s relativní molekulovou hmotností okolo 200 000 již mají velmi nízkou tekutost a zhoršují tím jejich zpracovatelnost[17].

4.2 Vlastnosti a jejich výroba

Polykarbonáty jsou polymerní materiály, které při zahřívání přecházejí do plastického stavu, kde je lze snadno tvářet a zpracovávat různými technologiemi. Do tuhého stavu přejdou ochlazením pod teplotu tání. Protože při zahřívání nedochází ke změnám chemické struktury, lze proces měknutí a následného tuhnutí opakovat teoreticky bez omezení. Jedná se pouze o fyzikální proces [25].

Polykarbonáty jsou zbarveny lehce do žluta a jsou velmi transparentní. Propouští přes 90% světla ve viditelné oblasti. Jsou samozhášivé s teplotou vzplanutí přesahující 500 °C. Jsou velmi málo nasákové a je možné je sterilizovat přehřátou parou při 120°C. Při těchto podmínkách však mohou slabě hydrolyzovat [17].

Mají vynikající mechanické vlastnosti, jako je houževnatost (téměř nejvyšší ze všech plastů), pevnost, tuhost a tvrdost. Mechanické vlastnosti se příliš nemění v rozsahu teplot - 100°C až do 120°C (až na některé jeho modifikace, které mají vyšší tepelnou stabilitu) a lze jej podstatně zlepšit přidáním skleněných vláken. Odolává slabým kyselinám, olejům, benzínu. Špatná odolnost je proti louchům, skupině rozpouštědel a podléhá korozi za napětí [12].



Obrázek 19. Příprava polykarbonátu fosgenací [13]

Rázová a vrubová houževnatost je vysoká, tečení relativně malé. Odolnost proti povětrnostním vlivům je malá, a proto se povrch polykarbonátů může upravovat lakováním vysoce odolnými UV laky [13].

4.3 Přípravné zpracování

Plasty obecně nelze bezprostředně zpracovávat v hotové výrobky. Nejdříve musí projít technologiemi přípravného zpracování, kdy se do plastů přidávají různé přísady, nebo se odstraňují těkavé podíly, jako je např. voda. Polymerům musí být také dán tvar pro další zpracování (granulát, prášek, kaše, atd.) Tyto technologie se potom označují jako technologie přípravného zpracování a představují mezistupeň mezi výrobou polymeru a vlastním zpracováním. Patří sem technologie míchání a hnětení, granulace, sušení a doprava materiálu. [25]

4.3.1 Mísení plastu s ostatními přísadami – Technologie míchání

Technologie míchání je založena na smíchání základního polymeru s ostatními přísadami pro zlepšení vlastností plastu (stabilizátory, plniva, změkčovadla, barviva, atd.) nebo pro zlepšení a usnadnění zpracování (např. maziva). Míchání je proces, kdy dochází ke smíchání minimálně dvou složek v míchacím prostoru zařízení tak, aby bylo dosaženo požadované rovnoměrnosti rozložení jednotlivých komponentů ve výsledném produktu s požadovaným stupněm homogenity.

4.3.2 Probarvování plastu – Technologie hnětení

Proces hnětení může být zařazen do technologie míchání, které je ale velmi intenzivní a hmota je ve změkklém stavu. Hlavní částí hnětacích zařízení, kde dochází

k probarvování termoplastů je jedno-, nebo dvou-šnekový extruder, do kterého jsou přiváděny násypkou směsi promísených barviv a pigmentů automaticky.

Příprava černého neprůhledného (opacitního) PC (APEC 1895) spočívá v rozdispergování anorganických černých sazí v polykarbonátové matici.

K přípravě šedého PC (APEC 1895) se používá kombinace směsi černých sazí, bílého anorganického - povrchově upraveného pigmentu TiO_2 s velmi nízkým obsahem vzdušné i krystalické vody (max. do 0,2%) pro dosažení požadovaného odstínu barvy a světlosti. K barevné korekci (standardizace) výsledného odstínu se přidávají ještě žluté a červené (oxidy železa) anorganické, nebo organické pigmenty. Celkový obsah pigmentů, nebo barviv se pohybuje v rozmezí 2-3% hm.

Pro přípravu transparentního PC (Makrolon AL2447), jehož přírodní odstín je lehce nažloutlý, se pro barevnou korekci (standardizaci) vedoucí k potlačení žlutého odstínu kombinuje polymerní matrice se speciálními barvivami pro PC a nanopigmenty o velikosti menších $<10\mu\text{m}$.

4.3.3 Granulování plastu – Technologie granulace

Konečným stupněm přípravného zpracování je granulace, kdy materiál získává tvar granulí, který je vhodný pro další zpracování, neboť granule mají dobrou sypnou hmotnost, lze je dobře směšovat s dalšími materiály, např. barvivami a lze je dobře dávkovat. Technologie granulace spočívá ve vytlačování strun polymeru granulační hlavou s mnoha otvory, které jsou ochlazovány ve vodní lázni a následně po odstranění přebytečné vody sekány na granule. [25]

4.3.4 Doprava a sušení

Materiál přichází z chemických závodů již připravený pro zpracování ve formě granulí. Ke skladování granulátu slouží cisterny o objemu 20tun, které se plní přímo z automobilových cisteren. Skladovací venkovní sila s PC granulátem jsou pneumaticky napojena na sušárny a odtud je vysušený materiál dodáván ke vstřikovacím strojům.

Polykarbonáty jsou navlhavé a před vlastním zpracováním se suší. Procesem sušení dochází k odstranění absorbované vlhkosti, neb přítomnost vody se projevuje zhoršováním

kvality povrchu výrobků a poklesem mechanických vlastností, kdy může docházet ke štěpení molekul. Sušení a navlhání jsou vratné děje a vysušený materiál je nutno chránit před vlhkostí v ovzduší. Sušící proces polykarbonátů probíhá při teplotě 110°C po dobu 4h. [25]

A/ Vlastnosti materiálu Makrolon AL2447 (transparentní polykarbonát)

- odolnost vůči nárazu
- široká pestrost barev
- vysoká optická jasnost (téměř jako sklo)
- vysoká tepelná odolnost
- vysoký lesk
- vynikající průhlednost (transparentnost)
- velká vrubová houževnatost

B/ Vlastnosti materiálu Apec 1895 (barvený polykarbonát)

- vysoká tepelná odolnost
- vysoký lesk
- velká vrubová houževnatost
- dobrá zpracovatelnost za tepla (výhodná zejména pro vstřikování do forem)
- vysoká tvarová stálost

Tabulka 3: Porovnání vybraných vlastností Makrolon AL 2447 a APEC 1895 [16]

Vybrané fyzikální vlastnosti	Makrolon AL 2447	APEC 1895
Modul pružnosti v tahu	2350 MPa	2400 MPa
Napětí v ohybu	90 MPa	105 MPa
Tažnost	0,06	6,80%
Napětí v tahu	65 MPa	74 MPa
Modul pružnosti v ohybu	2300 MPa	2400 MPa
Tepelná vodivost	0,2 W/m°C	0,2W/m°C
Hustota	1 200 kg/m ³	1 150 kg/m ³
Index lomu	1,586	1,573
Teplota skelného přechodu	150°C	150°C
Teplota tání	267°C	330°C

4.4 Způsoby zpracování

Nejčastěji se polykarbonáty zpracovávají vstřikováním, vytlačováním a vyfukováním. Technologie litím roztoku se dají vyrobit velmi tenké fólie, ale tento způsob se běžně nevyužívá. Při výrobě fólií bývá upřednostňována technologie vyfukováním do rukávu.

Proces vstřikování se provádí na běžných vstřikovacích strojích při zvýšených teplotách (240 až 250°C). Při vstřikování výrobků je vstřikovací tlak volen mezi 105 až 140 MPa. Teploty forem při vstřikování neklesají pod 70°C a to z důvodu snížení zamrzání napětí ve výrobcích. U výsledných výrobků bývá smrštění mezi 0,7 až 0,8% [17].

Při zpracování vytlačováním je užíváno běžných vytlačovacích strojů se šneky 15D (patnácti násobek průměru šneku) a kompresních poměrů 1:24. Šneky mívají jednoduchý závitový profil. Tyto základní podmínky bývají vhodné i pro technologii vyfukování, především dutých těles a nádob.

Polykarbonáty se využívají na aplikace, kde je vyžadována přesnost, tvarová stálost, odolnost, vysoké hodnoty mechanických a elektrických vlastností., dobrý povrchový vzhled a průhlednost, ve zvláštních případech i při velmi nízkých teplotách[17].

5 Zkušební vzorky

5.1 Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa byla vyrobena na vstřikovacím stroji ARBURG ALLROUNDER 420C se stejnými parametry vstřikování. Stroj byl osazen vstřikovací formou, jež byla navržena tak, aby při jednom vstřikovacím cyklu vyrobila najednou dvě zkušební tělesa o rozměrech 163 x 55 mm.

Polykarbonát ve formě granulí byl nasypán do sušícího zařízení ARBURG THERMOLIFT 100-2, kde byl následně 4h sušen. Během sušícího procesu došlo k přehřátí vstřikovacího stroje a vstřikovací formy na potřebné teploty. Tyto vstřikovací parametry byly určeny firmou HELLA.

Ke zkoušení byly připraveny tři druhy polykarbonátu. Jednalo se o polykarbonát transparentní – Makrolon AL2447, polykarbonát černý - Apec 1895 a šedý - Apec 1895.

Tabulka 5: *Parametry vstřikování*

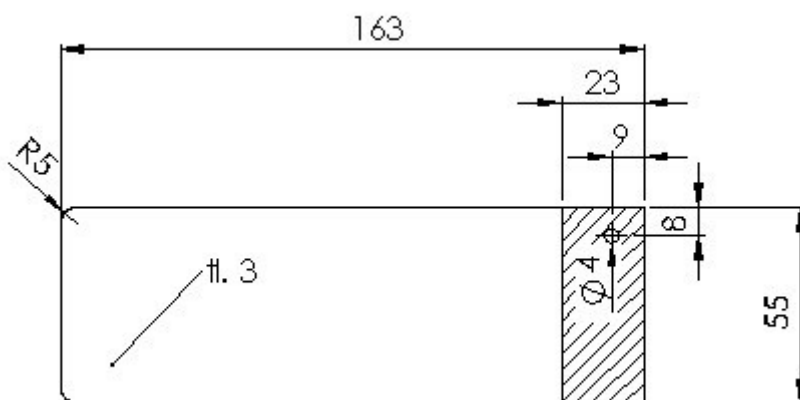
Parametry	Hodnoty	Jednotky
Materiál Polykarbonát (PC)		
Doba sušení	4	h
Teplota sušení	130	°C
Vstřikovací stroj		
Vstřikovací tlak	80	MPa
Rychlost vstřikování	60	m/s
Dotlak	60	MPa
Doba dotlaku	20	s
Doba chlazení	20	s
Teplota taveniny	250	°C
Teploty pásem plastikační jednotky		
Teplota pod násypkou	90	°C
Teplotní pásmo 1	305	°C
Teplotní pásmo 2	310	°C

Pokračování tabulky...

Teplotní pásmo 3	315	°C
Teplotní pásmo 4	320	°C
Teplota trysky	315	°C
Vstřikovací forma		
Teplota formy - pevná část	110	°C
Teplota formy - pohyblivá část	110	°C

5.2 Popis a rozměry zkušebních vzorků

Vzorky všech tří použitých materiálů byly vstřikovány do tvaru desek o rozměru 163 x 55 x 3mm viz obr. 20.



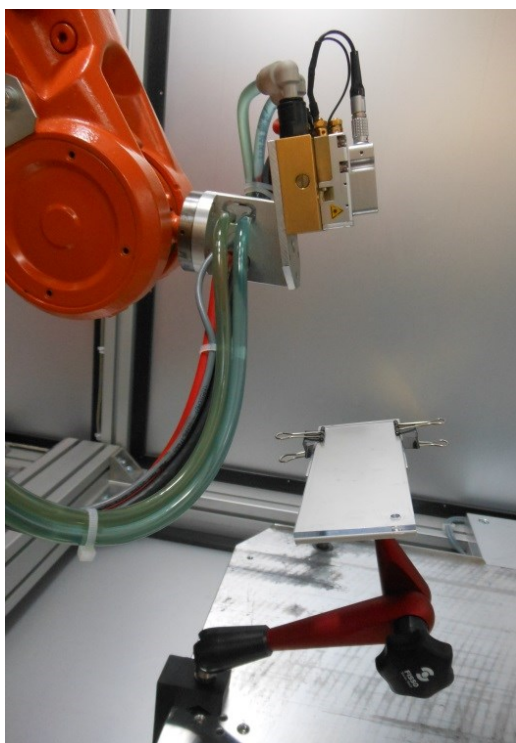
Obrázek 20. Náčrt zkušebního vzorku pro vizuální kontrolu

5.3 Příprava zkušebních vzorků

Zkušební vzorky pro přípravu experimentu byly vyrobeny metodou vstřikování. Materiály zkušebních těles byly zvoleny různé druhy polykarbonátu s ohledem na svařovaný díl uvnitř světlometu.

5.3.1 Příprava vzorků pro vizuální kontrolu

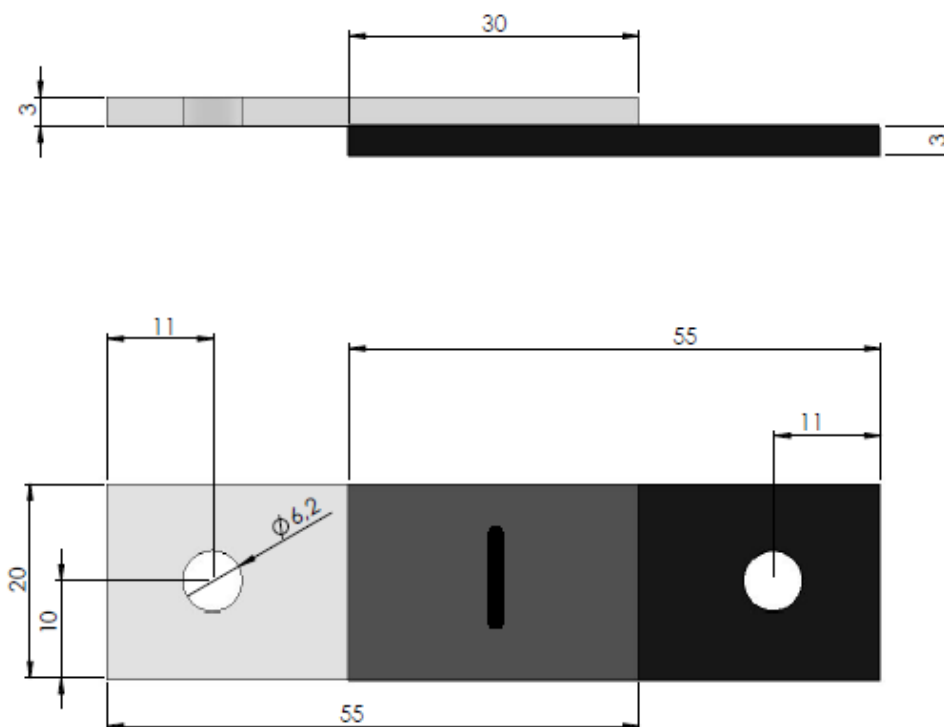
Pro potřeby vizuální kontroly byly svařeny vzorky v původním rozměru tak, aby byl vždy vytvořen průřez celou škálou svařovacích parametrů. Vzhledem k velikosti svařovaného vzorku byly zvoleny sloupce o sedmi svarech a počet sloupců volen tak, aby vždy na zkušební vzorek bylo možno nanést kompletní škálu proudových hodnot pro zvolený čas. Primárním cílem bylo vytvořit skupinu chronologicky řazených svarových spojů, na kterých je možno sledovat, kde se nachází hranice minimálních proudových hodnot pro samotný vznik svaru, dále pak změnu vzhledu svaru, jeho velikosti a výskyt případných vad. Na horní hranici svařovacích parametrů potom můžeme sledovat okamžik, kdy již svar mění svoji barvu, nebo kdy dochází k destrukci svaru z důvodu velké vnesené energie.



Obrázek 21. Upevnění vzorku pro vizuální kontrolu při svařování

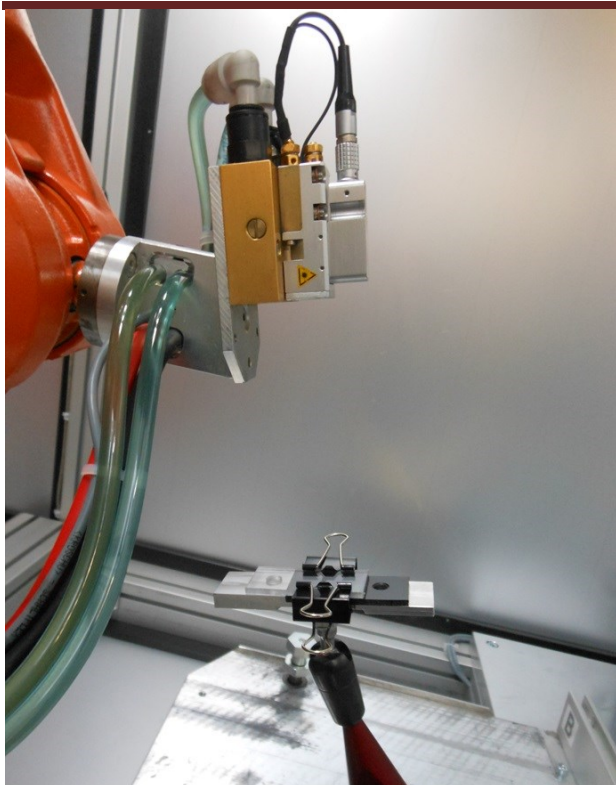
5.3.2 Příprava vzorků pro trhací zkoušku

Pro potřebu trhací zkoušky byla tělesa nařezána pásovou pilou na vhodné rozměry a vyvrtány díry o průměru 6,2 mm pro uchycení do trhacího stroje. Připravená zkušební tělesa sestavena viz. obr.22, uchycena pomocí svorek, které zajistily dostatečný přitlak (každá z nich působila přitlačnou silou ve výši 20 N) na svařovací přípravek následně a svařena.



Obrázek 22. Náčrtek vzorku s přeplátováním pro zkoušku smykem

Pro volbu svařovacích parametrů bylo využito výsledků vizuální kontroly svarů (viz. kap. 7.1.) Cílem bylo najít pro každý svařovací čas odpovídající hodnotu svařovacího proudu tak, aby bylo docíleno vizuálně stejného výsledku. Parametry jsou uvedeny v tab. 6 a 7.



Obrázek 23. Upevnění vzorku pro trhací zkoušku při svařování

Přehled připravených vzorků

Tabulka 6: Svařovací parametry pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý

Makrolon AL2447 + Apec 1895 šedý					
Svařovací čas [s]	2	3	4	5	6
Svařovací proud [A]	40	36	32	28	24

Tabulka 7: Svařovací parametry pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 černý

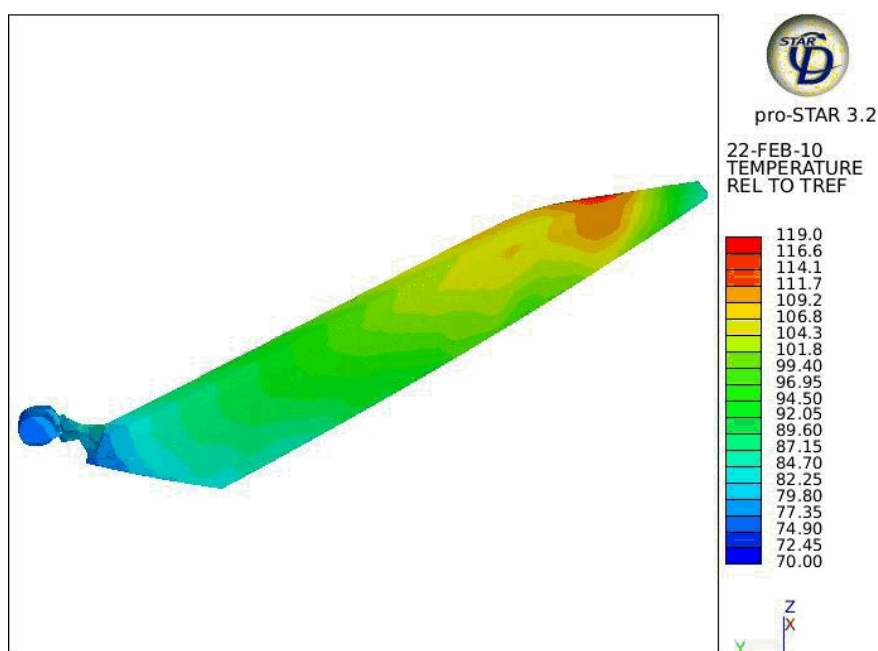
Makrolon AL2447 + Apec 1895 černý					
Svařovací čas [s]	2	3	4	5	6
Svařovací proud [A]	15	12	11,5	10,5	10

5.3.2.1 Zatížení vzorků pro trhací zkoušku

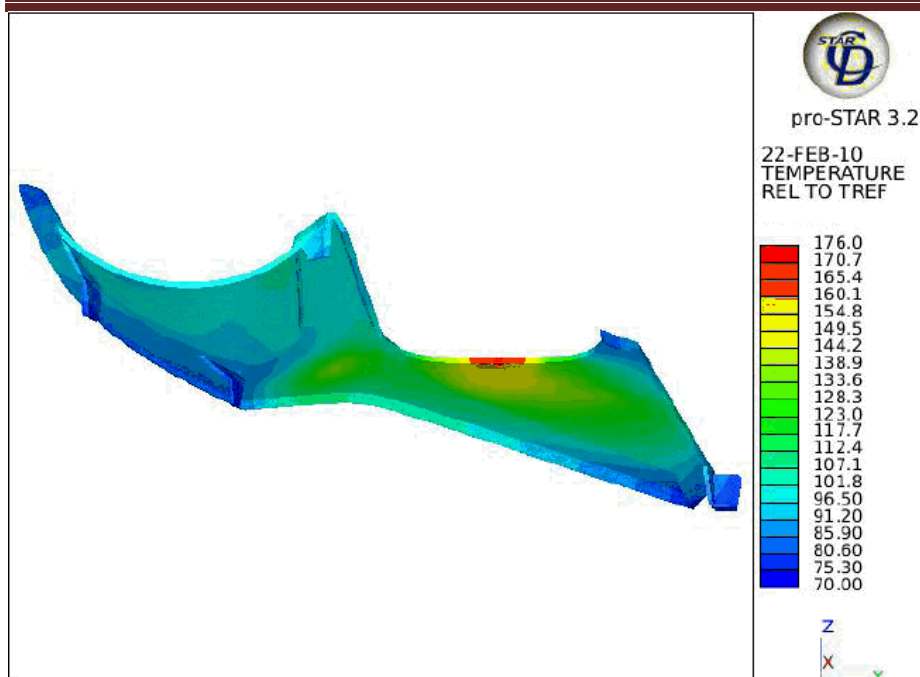
Aby bylo možno sledovat faktory ovlivňující pevnost svarového spoje, bylo stanoveno základní zatížení, ke kterým při běžném provozu světlometu dochází. Vzhledem k tomu, že jsou svarové spoje velice často používány právě v oblastech, kde není možno použít šroubová spojení, nebo mechanické klipy, což jsou například oblasti v blízkosti zdrojů světla, má toto umístění má za následek poměrně značnou tepelnou zátěž svarových spojů a materiálů jimi spojovaných. Dalším poměrně důležitým faktorem je vlhkost, která ve světlometu vzniká důsledkem provozu.

Při stanovování teplot, kterými budou vzorky zatěžovány, se vycházelo z výsledků simulací tepelného zatížení od zdrojů světla, což jsou v dnešní době i přes velký rozmach nových technologií, stále halogenové žárovky různých typů, oblíbené především pro svoji nízkou cenu a jednoduchou instalaci.

Na obr. 24 a 25 můžeme vidět výsledky tepelných simulací v 3D barevném diagramu. Výsledky simulací byly v rámci vývoje světlometu ověřeny praktickým měřením, které hodnoty potvrdilo.



Obrázek 24. Výsledek tepelné simulace optického filtru vyrobeného z materiálu Makrolon



Obrázek 25. Výsledek tepelné simulace rámu vyrobeného z černého materiálu Apec 1895

5.3.2.2 Vliv krátkodobé tepelné zátěže

Pro zjištění vlivu krátkodobé tepelné zátěže byly navrženy dvě teploty: 130 °C a 155°C. Teplota 130°C byla zvolena na základě výsledků tepelné simulace svařovaného dílu ve světlometu, viz obr. 24. Teplota 155°C byla zvolena z důvodu porovnatelnosti výsledků odtrhové zkoušky po rozdílných teplotách krátkodobého zatížení s ohledem na vyšší tepelnou odolnost materiálu APEC 1895.

Připravené zkušební vzorky byly uloženy na tepelně odolnou skleněnou podložku, a poté byly vloženy do temperační pece, kde byly vystaveny krátkodobému tepelnému namáhání po dobu 2 h. Pro zkoušku tepelného zatížení byla použita sušící pec značky BINDER typ BD 53 s kalibrovanou maximální tepelnou zátěží do 300°C.



Obrázek 26. Sušicí pec Binder BD 53

5.3.2.3 Vliv dlouhodobé tepelné zátěže

Ke zjištění vlivu dlouhodobého tepelného zatížení na připravené vzorky, byla na základě výsledků tepelných simulací světloometu s ohledem na svařované díly, zvolena teplota 130°C viz obr. 24 a25. Délka trvání teplotní zátěže byla zvolena s ohledem na dlouhodobé teplotní zkoušky prováděné pro celý světlomet, která je 240h (10 dní).

Připravené zkušební vzorky byly uloženy na tepelně odolnou skleněnou podložku, následně byly vloženy do temperační pece, kde byly vystaveny dlouhodobému tepelnému namáhání po dobu 240 h. Pro zkoušku tepelného zatížení byla použita sušicí pec značky BINDER typ BD 53 s kalibrovanou maximální tepelnou zátěží do 300°C.

5.3.2.4 Zatížení kondenzační vodou - Sauna test

Zatížení připravených vzorků bylo provedeno dle normy DIN EN ISO 50017. Jedná se o vlhkostní test v konstantní atmosféře 100% relativní vlhkosti a zvýšené teploty 40°C po dobu 48 hodin.

Zkouška odolnosti ve vlhkostní komoře spočívala ve volném zavěšení připravených vzorků ve vertikální poloze tak, aby docházelo ke kondenzaci čistých vodních par

destilované vody na celém povrchu vzorků. Ke zkoušce byla použita stolní kondenzační komora značky KOHLER Automobiltechnik typu HK 320 o objemu 300 litrů kalibrovaná dle ISO 17025 (měření teploty a relativní vlhkosti), viz obr. 27.



Obrázek 27: Kondenzační komora KOHLER Automobiltechnik, typ HK 320

6 VADY SVAROVÝCH SPOJŮ

6.1 Typy vad svarových spojů

Vadou svaru obecně rozumíme odchylku od předepsaných vlastností, tj. od smluvního vzorku, technické normy, popř. jiných příslušných předpisů.

Vady mohou být buď zjevné, tj. takové, které jsme schopni odhalit pouhým okem, nebo za pomoci jednoduchých pomůcek. Za skryté jsou považovány takové, které odhalíme za pomoci laboratorních přístrojů, nebo zkoušek.

Dále vady dělíme na přípustné a nepřípustné. Vady přípustné jsou vady, které dle příslušných předpisů není nutno odstraňovat. Vady nepřípustné se dále dělí na opravitelné a neopravitelné.

Vady vznikající při svařování se ve většině případů týkají necelistvostí. Defekty vyskytující se ve svarových spojkách a návarech se dále dělí do dvou hlavních skupin. První skupinou jsou vady plošné např. trhliny, neprůvazy a studené spoje. Do druhé skupiny řadíme vady objemové tj. póry, bubliny, vměstky a nepravidelnost povrchu [10].

Hodnocení vad podle polohy vady ve svaru je rozdělení na vady povrchové a vady vnitřní.

6.2 Zkušební metody svarových spojů

Zkušební metody svarových spojů se v základním principu dělí na nedestruktivní a destruktivní.

Nedestruktivní zkoušky probíhají na svarcích bez jakéhokoliv porušení svaru. Z toho vyplývá, že nedestruktivní zkoušky lze provádět i na hotovém výrobku bez jakéhokoliv znehodnocení, či poškození pro jeho další použití. Jejich nevýhodou však je fakt, že nemáme možnost ověřovat zcela prokazatelně všechny užité vlastnosti svarových spojů. Např. pevnost svarového spoje, plastické vlastnosti, odolnost proti cyklickému namáhání a podobně nelze vůbec spolehlivě určit z nedestruktivních zkoušek. Základní nedestruktivní zkouškou je vizuální kontrola, která ať už pouhým okem, nebo za pomoci

jednoduchých zvětšovacích skel, či mikroskopů, představuje jednoduché, ale velice často opomíjené hledisko k jednoduchému posouzení provedeného sváru. U vizuální kontroly hodnotíme zejména vzhled svaru, tvarové odchylky, výrony taveniny, vzduchové bubliny, barevné změny, viditelné lesklé okrajové pásy podél sváru nebo znatelné praskliny, které jsou základním znakem chybně provedeného sváru [15].

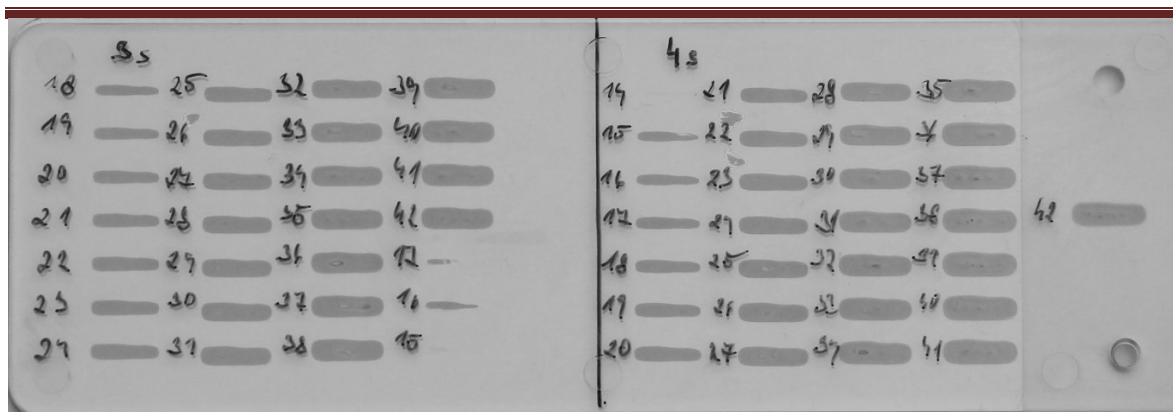
Mezi další nedestruktivní zkoušky se řadí zkoušky prozářením, což je např. zkoušení ultrazvukem, rentgenem nebo výpočtová tomografie, nesprávně nazývaná počítačová tomografie. Těmito zkouškami lze s úspěchem zjišťovat bubliny, dutiny a nehomogenity uvnitř netransparentních materiálů, kterým je například termoplast polykarbonát (Apec), který je v netransparentním provedení použit pro tuto diplomovou práci. Vzhledem k jejich časové a finanční náročnosti, nelze tyto zkoušky provádět běžně při výrobě na 100% dílů, protože by výrobu podstatně zpomalily a prodražily. Můžeme však v praxi jít několik výjimek jako je např. výroba luxusních vozů, kde je každý díl podroben zkouškám prozářením.

Mezi destruktivním typy zkoušení řadíme například tahovou zkoušku, kdy se zkoušený vzorek zatěžuje tahem, až do samotného roztržení. Zjišťují se síly k tomu potřebné. Tato zkouška může být prováděna za různých teplot, od vysokých, až po velice nízké. Zkoušku tahem je možno provádět i v dlouhodobém časovém horizontu, např. jako zkouška dlouhodobého namáhání v tahu.

Další destruktivní zkouškou, která se v automobilové praxi používá např. pro homologační zkoušky a pro zjišťování otěru jednotlivých komponent je vibrační zkouška.

6.3 Vizuální kontrola svaru

Vizuální kontrola je základní, ovšem často opomíjenou nedestruktivní zkouškou. Její princip spočívá ve vizuální kontrole svarového spoje. U vizuální kontroly byla hodnocena zejména velikost svaru, která vypovídá o tom, do jaké míry byl do svarového spoje směřován dostatek energie, dále případně vzniklé zabarvení svaru, tvorba výronů taveniny do oblasti mimo svár, pění svaru, v jehož důsledku má svar nižší pevnost, popř. vznik viditelných prasklin ve svarovém spoji.

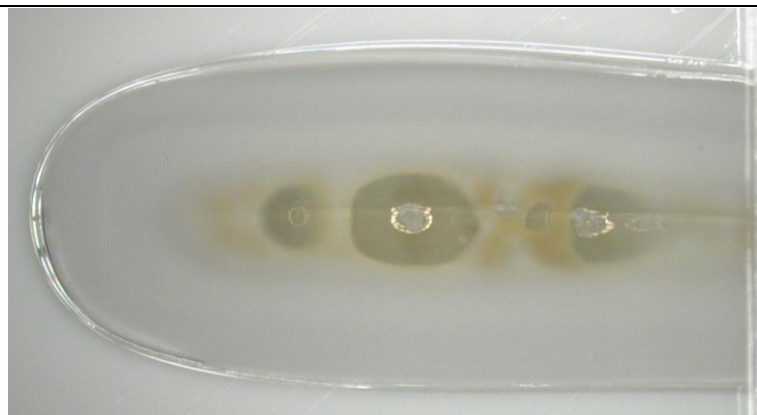
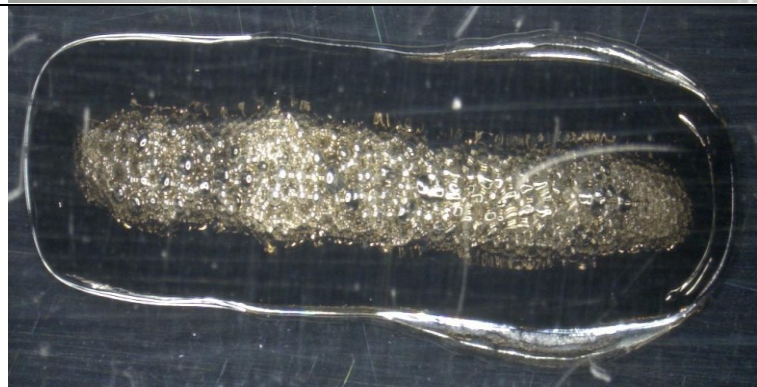


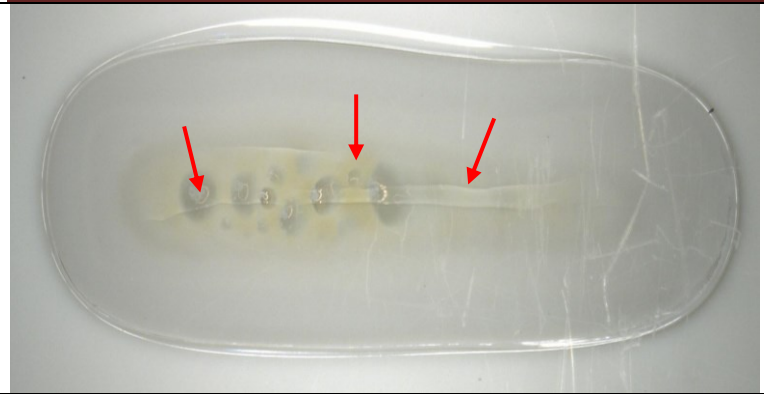

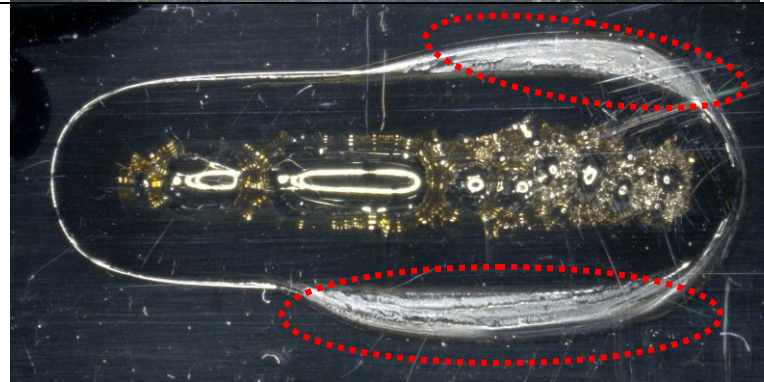
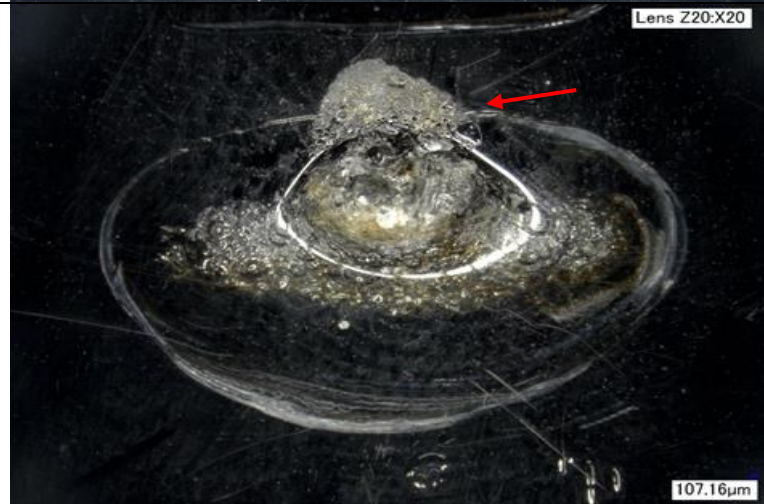
Obrázek 27. Porovnávací vzorek pro vizuální kontrolu s označenými svařovacími parametry (čas a proud)

6.3.1 Vady hodnocené při vizuální zkoušce

Hodnocení kvality svarového spoje bylo provedeno vizuálně dle přiložených fotografií

Tabulka 8: Přehled hodnocených vad

Fotografie hodnocených vad	Popis
	Zabarvení svaru
	Vznik bublin Zpěnění svaru

	<p><i>Vznik trhlin ve svaru</i></p>
	<p><i>Výron taveniny mimo obrys svaru</i></p>
	<p><i>Lesklé okraje</i></p>
	<p><i>Vyvření taveniny přes transparentní materiál</i></p>

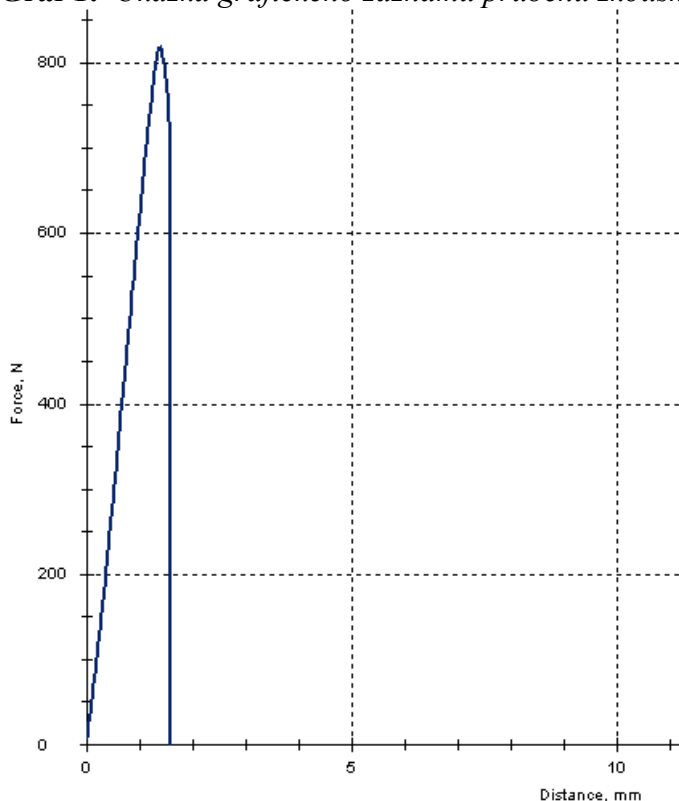
6.4 Trhací zkouška

Tato zkouška byla prováděna na zkušebním zařízení Zwick/Roell Z010 umístěném v měřicím a testovacím centru společnosti HELLA. Cílem zkoušky bylo zjistit hodnotu síly, která je potřebná pro roztržení svarů při namáhání na smyk. Při zkoušce bylo sledováno chování materiálu za působení klidných, plynule a spojitě se měnících sil, bez rázů, při současném zjišťování závislosti mezi působící silou a deformací zkušebních vzorků. Rychlost posuvu portálu nesoucího měřicí hlavu byla konstantní a zatěžování zkušebního tělesa pokračovalo plynule až do jeho roztržení.

6.4.1 Průběh zkoušky

Zkušební vzorek za pomoci předpřipravených otvorů byl navlečen na hák pevně ukotvený do měřicí hlavy. Za pomoci ručního posuvu bylo nalezeno takové polohy, která umožnila spodní uchycení, a fixaci do čelistí svěráku. Tato pozice byla zapsána do paměti stroje, aby nemusela být s každým vzorkem znovu nastavována. Průběh zkoušky byl automaticky zaznamenáván, a to ve formě grafického záznamu, včetně vyhodnocení nejvyšší dosažené síly a protažení zkušebního vzorku.

Graf 1: Ukázka grafického záznamu průběhu zkoušky smykem



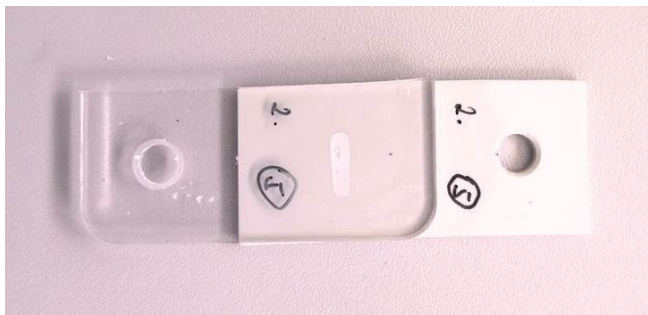


Obrázek 34. Upnutí vzorku při zkoušce smykem

6.4.2 Rozměry zkušebních těles

Rozměr svařených zkušebních těles byl volen s ohledem na délku laserového sváru a velikosti použitých testovacích a zkušebních zařízení. Rozměry samotných destiček transparentního a černého (absorpčního) polykarbonátového materiálu byly voleny tak, aby výsledný rozměr svařeného vzorku v požadované pozici odpovídal velikosti 20 x 55mm.

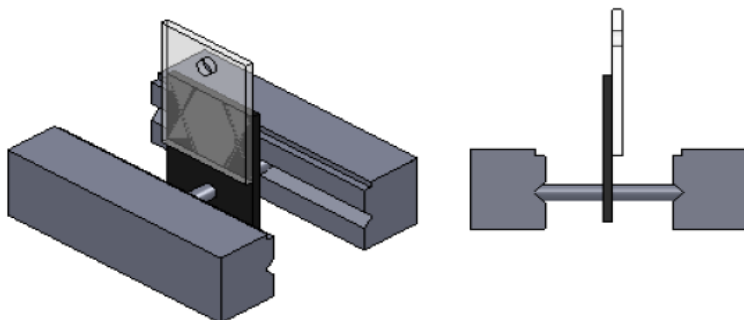
Vzorky byly nařezány pomocí pásové pily a ještě před procesem svařování, aby nedošlo k ovlivnění kvality svarového spoje vyvrtány díry pro upevnění do zkušebního zařízení.



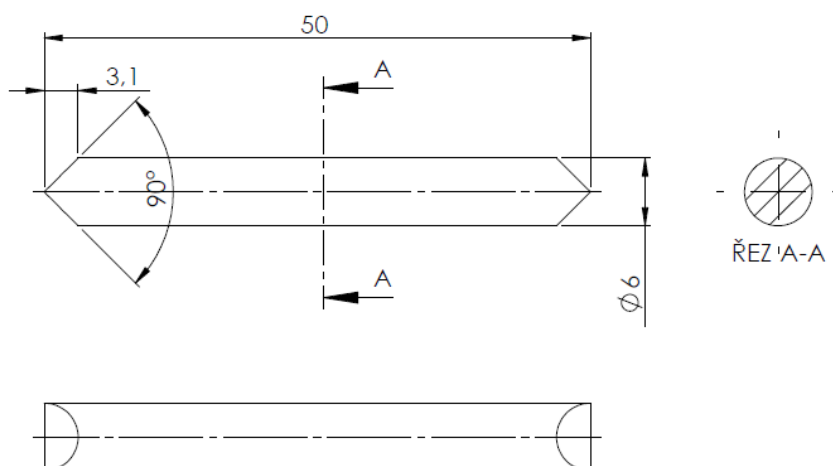
Obrázek 35. Ukázka zkušebního vzorku pro zkoušku smykem

6.4.3 Upnutí těles pro zkoušku

Pro mechanickou zkoušku pevnosti sváru ve smyku bylo důležité pevné upnutí testovaných vzorků po celou dobu průběhu zkoušky. Bylo zvoleno upnutí do čelistí strojního svěráku přes středový kolík o průměru 6mm se zbroušenými konci a vrcholovém úhlu 90° (viz obr. 33) tak, aby došlo k přesnému a pevnému uchycení do drážek strojního svěráku. Tímto upnutím byla přesně určena a vymezena stejná pozice spodního dílu svarku navlečená na kolík, pro všechny testované vzorky.



Obrázek 36. Upnutí vzorku do čelistí se středovým kolíkem



Obrázek 37. Kolík pro upnutí vzorku do čelistí svěráku pro zkoušku smykem

6.4.4 Parametry zkoušky na smyk

Tabulka 9: *Parametry zkoušky*

Veličina	Hodnota	Jednotka
Teplota okolí	21,5	°C
Teplota zkušebních vzorků	21,5	°C
Rychlost posuvu háku	20	mm·min ⁻¹
Měřený rozsah	0-1500	N

6.4.5 Zařízení pro zkoušení pevnosti svaru

Mechanické zkoušky byly prováděny na trhacím zařízení Zwick/Roell Z010 s měřicí hlavou o rozsahu měření 0-1500 N (viz. obr. 38) s možností monitorování změn souvisejících se ztrátou pevnosti svarového spoje v průběhu zkoušky. Pevné upnutí připravených vzorků do čelistí strojního držáku (viz kapitola 5.4.3) zajišťovalo porovnání výsledků mezi připravenými vzorky.

Tabulka 10: *Parametry zařízení Zwick/Roell Z010*

Veličina	Hodnota	Jednotka
Testovací zatížení ve vertikálním směru	10	kN
Šířka testovací plochy	420	mm
Výška testovacího prostoru	1041	mm
Maximální vysunutí hlavy	976	mm
Výška	1291	mm
Šířka	857	mm
Hloubka	346	mm
Celková váha	130	kg
Minimální zdvih	20	mm
Minimální rychlost posuvu	0,1	mm/min
Maximální rychlost posuvu	100	mm/min
Přesnost rychlosti posuvu	1	%
Rozlišení pojezdového systému	0,09	μm
Opakovatelnost	±2	μm



Obrázek 38. Zařízení pro zkoušení pevnosti svaru Zwick/Roell Z010

6.5 Trhací zkouška za zvýšené teploty

Tato zkouška byla provedena na zkušebním zařízení Zwick/Roell Z150 umístěném v laboratořích VŠB – TU Ostrava. Cílem zkoušky bylo zjistit maximální hodnotu síly potřebné k roztržení svarového spoje při namáhání na smyk za zvýšené teploty. Při zkoušce bylo sledováno chování materiálu za působení klidných, plynule a spojitě se měnících sil, bez rázů, při současném zjišťování závislosti mezi působící silou a deformací zkušebních vzorků. Rychlost posuvu portálu nesoucího měřicí hlavu byla konstantní a zatěžování zkušebního tělesa pokračovalo plynule až do jeho roztržení. Při roztržení svarového spoje byla zkouška ukončena. Zařízení pro zkoušení pevnosti svaru za zvýšené teploty

Mechanické zkoušky byly prováděny na trhacím zařízení Zwick/Roell Z150 s měřicí hlavou o rozsahu měření 0-1500 N (viz. obr. 39) a hodnota posuvu byla stejně jako při odtrhové zkoušce za pokojové teploty nastavena na 20 mm/min.

6.6 Průběh zkoušky

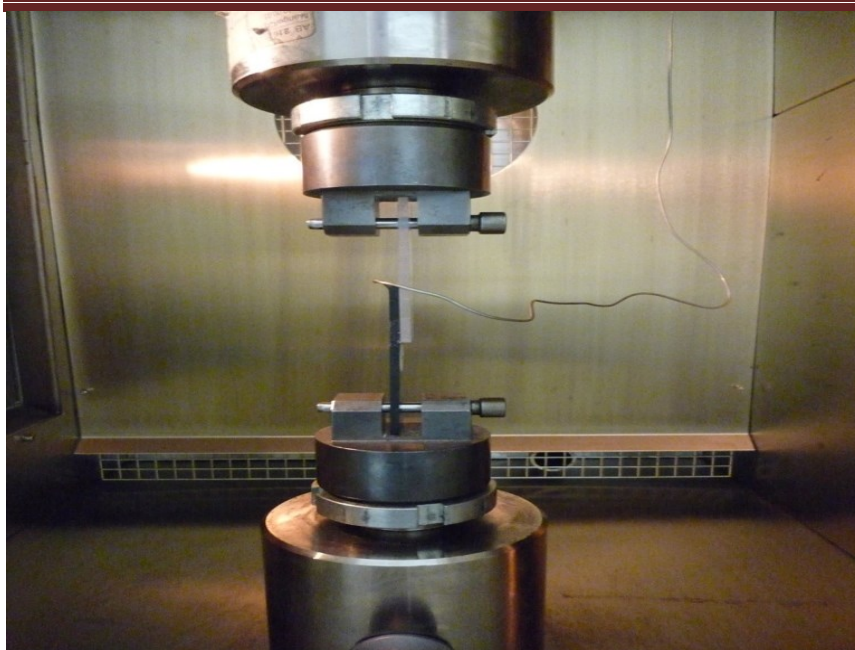
Zkušební vzorky byly vloženy do sušící pece, kde byly podobu 30 min. temperovány na teplotu, při které měly být následně odtrženy. Následně byly upnuty do čelistí zkušebního zařízení a po opětovné kontrole teploty byla zkouška započata.



Obrázek 39. Zařízení pro zkoušení pevnosti svaru za zvýšené teploty Zwick/Roell Z150

Tabulka 11: *Parametry testovacího zařízení Zwick/Roell Z150*

Veličina	Hodnota	Jednotka
Testovací zatížení ve vertikálním směru	150	kN
Šířka testovací plochy	640	mm
Výška testovacího prostoru	1539	mm
Maximální vysunutí hlavy	976	mm
Výška	2141	mm
Šířka	960	mm
Hloubka	766	mm
Celková váha	750	kg
Minimální zdvih	20	mm
Minimální rychlost posuvu	0,0005	mm/min
Maximální rychlost posuvu	900	mm/min
Přesnost rychlosti posuvu	0,005	%
Rozlišení pojezdového systému	0.0123	μm
Opakovatelnost	±2	μm



Obrázek 40. Upnutí vzorku pro zkoušku smykem za zvýšené teploty s připojeným teplotním čidlem

7 VÝSLEDKY

7.1 Výsledky vizuální kontroly svarů

7.1.1 Výsledky vizuální kontroly pro kombinaci materiálů

Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý

V tabulce 12 jsou shrnuty výsledky vizuální kontroly pro kombinaci materiálů Makrolon AL 2447 a Apec 1895 šedý. Svařovací proud se měnil od 20 do 40 A. Při zvyšování svařovacího proudu docházelo k postupnému zvětšování svaru až na rozměr 9,5 x 2,8 mm. Ke změně barvy ani v jedno z případů nedošlo, avšak u svařovacího proudu 41 a 42 A docházelo k pění svaru, což svědčí o přílišném množství vnesené energie. Za vyhovující byly uznány svary v rozmezí 27 až 40 A.



Obrázek 41. Vzorek pro vizuální kontrolu pro 2 a 6 s svařovacího času

Tabulka 12: Výsledky vizuální kontroly pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý pro svařovací čas 2s

Makrolon AL2447 x Apec 1895 šedý							
Svařovací čas: 2s							
Svařovací proud [A]	Šířka svaru [mm]	Výška svaru [mm]	Změna barvy (hnědnutí)	Pění svaru	Vznik prasklin	Vznik bublin (počet)	Hodnocení
20	8,2	1,5	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
21	8,6	1,6	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
22	8,6	1,6	Ne	Ne	Ne	2	NOK
23	8,7	1,7	Ne	Ne	Ne	1	NOK
24	8,9	1,8	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
25	9	1,9	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
26	9	2	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
27	9,1	2,1	Ne	Ne	Ne	ne	OK
28	9,1	2,1	Ne	Ne	Ne	ne	OK
29	9,2	2,1	Ne	Ne	Ne	ne	OK
30	9,2	2,1	Ne	Ne	Ne	ne	OK
31	9,3	2,2	Ne	Ne	Ne	2	OK
32	9,3	2,3	Ne	Ne	Ne	2	OK
33	9,3	2,3	Ne	Ne	Ne	1	OK
34	9,4	2,4	Ne	Ne	Ne	2	OK
35	9,4	2,5	Ne	Ne	Ne	2	OK
36	9,4	2,6	Ne	Ne	Ne	2	OK
37	9,5	2,6	Ne	Ne	Ne	2	OK
38	9,5	2,6	Ne	Ne	Ne	2	OK
39	9,5	2,7	Ne	Ne	Ne	2	OK
40	9,5	2,7	Ne	Ne	Ne	2	OK
41	9,5	2,8	Ne	Ano	Ne	pění	NOK
42	9,5	2,8	Ne	Ano	Ne	pění	NOK

V tabulce 13 jsou uvedeny výsledky vizuální kontrola pro svařovací čas 3s. Pro tento svařovací čas byly voleny parametry svařovacího proudu v rozmezí od 15 do 40 A. Velikost svaru se plynule zvětšovala až na konečných 10,3 x 3,2 mm. Vizuální kontrole vyhověly svary v rozmezí proudových hodnot od 27 do 40A. Při použití svařovacího času 3s nebyly zaregistrovány změny barvy, pění svaru ani vznik prasklin.

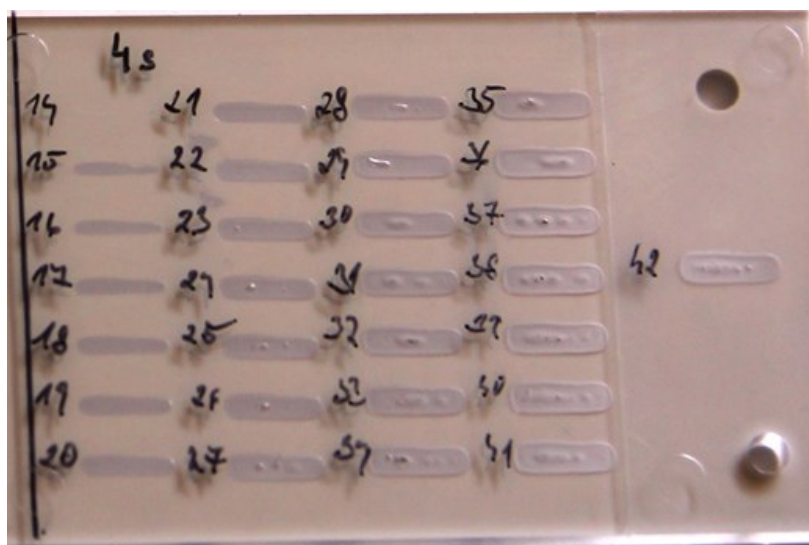


Obrázek 42. Vzorek pro vizuální kontrolu pro 3 s svařovacího času pro kombinaci materiálů Makrolon AL 2447 a Apec 1895 šedý

Tabulka 13: Výsledky vizuální kontroly pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý pro svařovací čas 3s

Makrolon AL2447 x Apec 1895 šedý							
Svařovací čas: 3s							
Svařovací proud [A]	Šířka svaru [mm]	Výška svaru [mm]	Změna barvy (hnědnutí)	Pění svaru	Vnik prasklin	Vznik bublin (počet)	Hodnocení
15	8,6	1,4	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
16	8,7	1,8	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
17	9	1,9	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
18	9	1,9	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
19	9	1,9	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
20	9	2	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
21	9	2	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
22	9	2	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
23	9,2	2,1	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
24	9,3	2,1	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
25	9,4	2,2	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
26	9,5	2,3	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
27	9,6	2,4	Ne	Ne	Ne	1	OK
28	9,6	2,5	Ne	Ne	Ne	2	OK
29	9,8	2,5	Ne	Ne	Ne	3	OK
30	10	2,6	Ne	Ne	Ne	3	OK
31	10	2,7	Ne	Ne	Ne	1	OK
32	10	2,7	Ne	Ne	Ne	2	OK
33	10	2,7	Ne	Ne	Ne	2	OK
34	10,1	2,7	Ne	Ne	Ne	2	OK
35	10,1	2,8	Ne	Ne	Ne	4	OK
36	10,2	2,8	Ne	Ne	Ne	1	OK
37	10,2	2,9	Ne	Ne	Ne	2	OK
38	10,2	2,9	Ne	Ne	Ne	1	OK
39	10,2	3	Ne	Ne	Ne	1	OK
40	10,2	3	Ne	Ne	Ne	3	OK
41	10,2	2,1	Ne	Ne	Ne	2	OK
42	10,3	3,2	Ne	Ne	Ne	5	NOK

V tabulce 14 jsou zaznamenány výsledky vizuální kontroly pro svařovací čas 4s a kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 Šedý. Pro tento svařovací čas byly zvoleny svařovací proudy v rozmezí 14 až 42 A. Jako vyhovující byly hodnoceny svary v rozmezí 27 až 41 A. Nebyly zaznamenány změny barvy ani jiné hodnocené vady. Svařovací čas 14 A se projevil jako nedostatečný pro vznik svaru, naopak při použití svařovacího proudu 42 A se ve svaru objevilo velké množství bublin, což napovídá o tom, že při vyšších hodnotách by došlo k napěnění svaru.

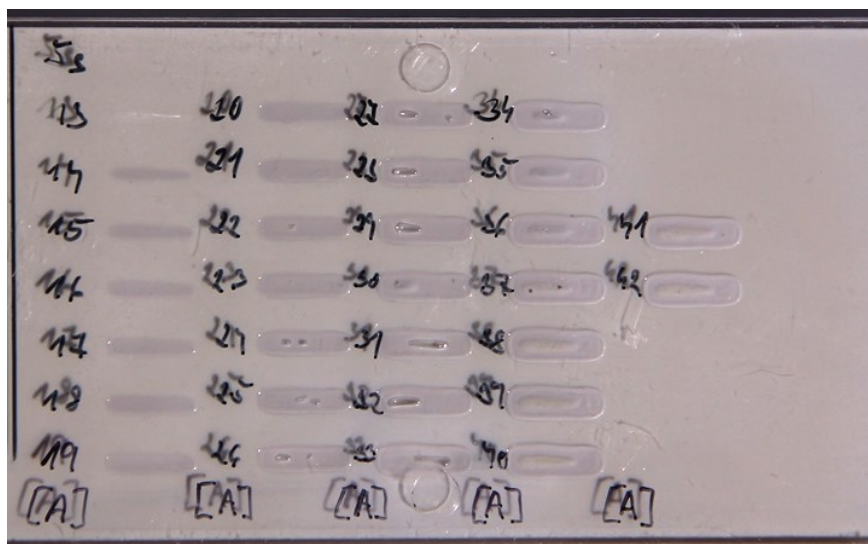


Obrázek 43. Vzorek pro vizuální kontrolu pro 4 s svařovacího času pro kombinaci materiálů Makrolon AL 2447 a Apec 1895 šedý

Tabulka 14: Výsledky vizuální kontroly pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý pro svařovací čas 4s

Makrolon AL2447 x Apec 1895 šedý							
Svařovací čas: 4s							
Svařovací proud [A]	Šířka svaru [mm]	Výška svaru [mm]	Změna barvy (hnědnutí)	Pění svaru	Vnik prasklin	Vznik bublin (počet)	Hodnocení
14	0	0	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
15	8,2	1,6	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
16	8,3	1,7	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
17	8,5	1,7	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
18	8,9	2	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
19	8,9	2	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
20	8,9	2,1	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
21	9	2,1	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
22	9	2,2	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
23	9,1	2,4	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
24	9,2	2,5	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
25	9,2	2,6	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
26	9,4	2,7	Ne	Ne	Ne	ne	NOK
27	9,4	2,7	Ne	Ne	Ne	1	OK
28	9,5	2,8	Ne	Ne	Ne	2	OK
29	9,6	2,8	Ne	Ne	Ne	3	OK
30	9,7	2,9	Ne	Ne	Ne	3	OK
31	9,7	2,9	Ne	Ne	Ne	1	OK
32	9,7	3	Ne	Ne	Ne	2	OK
33	9,8	3,1	Ne	Ne	Ne	2	OK
34	9,8	3,1	Ne	Ne	Ne	2	OK
35	9,9	3,1	Ne	Ne	Ne	4	OK
36	9,9	3,2	Ne	Ne	Ne	1	OK
37	10	3,3	Ne	Ne	Ne	2	OK
38	10	3,3	Ne	Ne	Ne	1	OK
39	10	3,3	Ne	Ne	Ne	1	OK
40	10,2	3,4	Ne	Ne	Ne	3	OK
41	10,3	3,5	Ne	Ne	Ne	2	OK
42	10,3	3,5	Ne	Ne	Ne	5	NOK

V tabulce 15 jsou uvedeny výsledky vizuální kontroly svaru pro kombinaci materiálů Makrolon AL 2447 a Apec 1895 šedý pro svařovací čas 5s. Proudové hodnoty byly voleny v rozmezí 14 až 42 A. Při použití proudu 14 A nedošlo ke vzniku svaru, naopak při použití svařovacího proudu nad 37 A vznikala ve svaru pěna a nad 38 A vznikali viditelné praskliny. Za vyhovující byly uznány svary v rozmezí svařovacího proudu 27 až 36 A. Při použití hodnoty svařovacího proudu 37 A a vyšší se objevily známky hnědnutí svaru, což svědčí o nadměrném množství vnesené energie.



Obrázek 44. Vzorek pro vizuální kontrolu pro 5 s svařovacího času pro kombinaci materiálů Makrolon AL 2447 a Apec 1895 šedý

Tabulka 15: Výsledky vizuální kontroly pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý pro svařovací čas 5s

Makrolon AL2447 x Apec 1895 šedý							
Svařovací čas: 5s							
Svařovací proud [A]	Šířka svaru [mm]	Výška svaru [mm]	Změna barvy (hnědnutí)	Pění svaru	Vnik prasklin	Vznik bublin (počet)	Hodnocení
13	0	0	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
14	8,2	1,5	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
15	8,4	1,8	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
16	8,8	2	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
17	8,9	2,1	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
18	9	2,1	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
19	9,1	2,2	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
20	9,2	2,3	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
21	9,2	2,4	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
22	9,3	2,5	Ne	Ne	Ne	1	NOK
23	9,3	2,7	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
24	9,4	2,7	Ne	Ne	Ne	2	NOK
25	9,5	2,7	Ne	Ne	Ne	2	NOK
26	9,5	3,1	Ne	Ne	Ne	2	NOK
27	9,6	3,1	Ne	Ne	Ne	2	OK
28	9,7	3,2	Ne	Ne	Ne	1	OK
29	9,8	3,3	Ne	Ne	Ne	1	OK
30	9,8	3,3	Ne	Ne	Ne	1	OK
31	9,9	3,4	Ne	Ne	Ne	1	OK
32	10	3,5	Ne	Ne	Ne	1	OK
33	10	3,5	Ne	Ne	Ne	1	OK
34	10,2	3,5	Ne	Ne	Ne	1	OK
35	10,2	3,5	Ne	Ne	Ne	1	OK
36	10,3	3,6	Ne	Ne	Ne	1	OK
37	10,3	3,6	Ano	Ano	Ano	pění	NOK
38	10,4	3,6	Ano	Ano	Ano	pění	NOK
39	10,4	3,7	Ano	Ano	Ano	pění	NOK
40	10,5	3,8	Ano	Ano	Ano	pění	NOK
41	10,5	3,8	Ano	Ano	Ano	pění	NOK
42	10,6	3,8	Ano	Ano	Ano	pění	NOK

V tabulce 16 jsou uvedeny výsledky vizuální kontroly svaru pro kombinaci materiálů Makrolon AL 2447 a Apec 1895 šedý pro svařovací čas 6s. Pro tento svařovací čas byly vytvořeny svary v rozmezí 12 až 42 A svařovacího proudu. Velikost svaru se měnila plynule od počátečních hodnot 7,7 x 1,2 mm, při použití svařovacího proudu 13A, až po 10,6 x 4,3 mm při použití 42 A svařovacího proudu. Jako vyhovující byly hodnoceny svary vytvořené hodnotami svařovacího proudu od 27 do 33A. Od svařovacího 34 A bylo zaznamenáno pění svaru za současného vzniku prasklin a změny barvy.



Obrázek 45. Vzorek pro vizuální kontrolu pro 6 s svařovacího času pro kombinaci materiálů Makrolon AL 2447 a Apec 1895 šedý

Tabulka 16: Výsledky vizuální kontroly pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý pro svařovací čas 6s

Makrolon AL2447 x Apec 1895 šedý							
Svařovací čas: 6s							
Svařovací proud [A]	Šířka svaru [mm]	Výška svaru [mm]	Změna barvy (hnědnutí)	Pění svaru	Vnik prasklin	Vznik bublin (počet)	Hodnocení
12	0	0	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
13	7,7	1,2	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
14	8,6	1,5	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
15	8,6	1,8	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
16	8,7	2	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
17	8,8	2,1	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
18	9	2,2	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
19	9	2,2	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
20	9,1	2,4	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
21	9,1	2,5	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
22	9,3	2,5	Ne	Ne	Ne	1	NOK
23	9,4	2,7	Ne	Ne	Ne	1	NOK
24	9,4	2,8	Ne	Ne	Ne	1	NOK
25	9,5	3	Ne	Ne	Ne	1	NOK
26	9,5	3,1	Ne	Ne	Ne	1	NOK
27	9,6	3,2	Ne	Ne	Ne	1	OK
28	9,8	3,2	Ne	Ne	Ne	1	OK
29	9,8	3,4	Ne	Ne	Ne	3	OK
30	9,9	3,4	Ne	Ne	Ne	2	OK
31	9,9	3,4	Ne	Ne	Ne	1	OK
32	10	3,5	Ne	Ne	Ne	1	OK
33	10	3,6	Ne	Ne	Ne	1	OK
34	10,2	3,6	Ano	Ne	Ne	Pění	NOK
35	10,2	3,7	Ano	Ne	Ne	Pění	NOK
36	10,2	3,7	Ano	Ano	Ano	Pění	NOK
37	10,3	3,8	Ano	Ano	Ano	Pění	NOK
38	10,4	3,8	Ano	Ano	Ano	Pění	NOK
39	10,4	4	Ano	Ano	Ano	Pění	NOK
40	10,5	4	Ano	Ano	Ano	Pění	NOK
41	10,5	4,2	Ano	Ano	Ano	Pění	NOK
42	10,6	4,3	Ano	Ano	Ano	Pění	NOK

7.1.2 Výsledky vizuální kontroly pro kombinaci materiálů

Makrolon AL2447 a Apec 1895 černý

V tabulce 17 jsou vyhodnoceny výsledky vizuální zkoušky pro kombinaci materiál Makrolon AL 2447 a Apec 1895 černý pro svařovací čas 2s. Pro tuto kontrolu voleny parametry svařovacího proudu od 8 do 18 A. Minimální svařovací proud, při kterém svar vznikl byl 9 A, naopak při svařovacím proudu 16 A již svar vykazoval známky pění v kombinaci se změnou barvy, avšak bez viditelných prasklin. Jako vyhovující byly hodnoceny svary, vytvořené svařovacím proudem od 12 do 15,5 A.

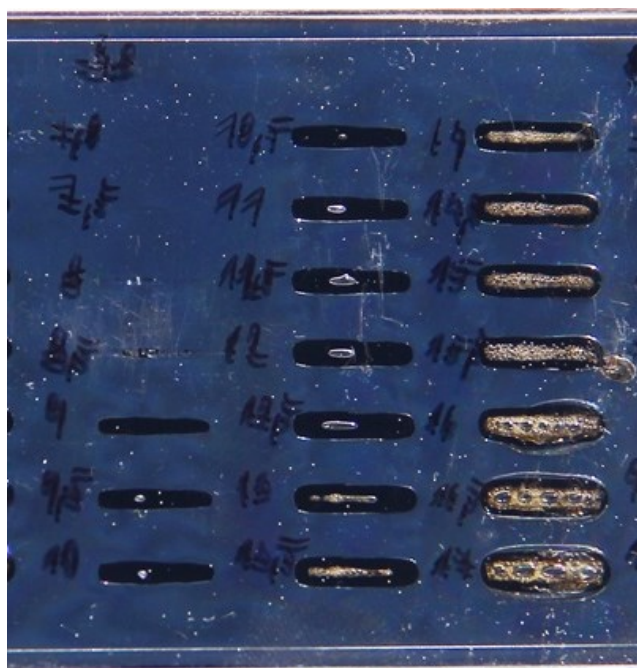


Obrázek 46. Vzorek pro vizuální kontrolu pro 2 s svařovacího času pro kombinaci materiálů Makrolon AL 2447 a Apec 1895 černý

Tabulka 17: Výsledky vizuální kontroly pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a*Apec 1895 šedý pro svařovací čas 2s*

Makrolon AL2447 x Apec 1895 černý							
Svařovací čas: 2s							
Svařovací proud [A]	Šířka svaru [mm]	Výška svaru [mm]	Změna barvy (hnědnutí)	Pění svaru	Vnik prasklin	Vznik bublin (počet)	Hodnocení
8	0	0	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
8,5	0	0	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
9	7,8	1,4	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
9,5	7,9	1,5	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
10	8	1,5	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
10,5	8,7	1,6	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
11	8,9	1,7	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
11,5	9,1	1,7	Ne	Ne	Ne	1	NOK
12	9,1	1,9	Ne	Ne	Ne	1	OK
12,5	9,2	2,1	Ne	Ne	Ne	2	OK
13	9,4	2,1	Ne	Ne	Ne	3	OK
13,5	9,7	2,1	Ne	Ne	Ne	2	OK
14	9,8	2,2	Ne	Ne	Ne	2	OK
14,5	9,8	2,3	Ne	Ne	Ne	2	OK
15	9,8	2,3	Ne	Ne	Ne	1	OK
15,5	9,9	2,4	Ne	Ne	Ne	3	OK
16	9,9	2,4	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
16,5	10	2,44	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
17	10,1	2,5	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
17,5	10,1	2,7	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
18	10,4	2,7	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK

V tabulce 18 jsou vyhodnoceny výsledky vizuální zkoušky pro kombinaci materiálů Makrolon AL 2447 a Apec 1895 černý pro svařovací čas 3s. Pro tuto kontrolu voleny parametry svařovacího proudu od 7,5 do 17 A. Minimální svařovací proud, při kterém svar vznikl byl 9 A, naopak při svařovacím proudu 13 A již svar vykazoval známky pění v kombinaci se změnou barvy, avšak bez viditelných prasklin. Při použití svařovacího proudu 15,5 A vznikl vpravo od svaru výron taveniny a při zvyšujícím se proudu svar silně pění a byl geometricky nepravidelný, což svědčilo o nadměrném množství vnesené energie. Jako vyhovující byly hodnoceny svary, vytvořené svařovacím proudem od 9,5 do 12,5 A.



Obrázek 47. Vzorek pro vizuální kontrolu pro 3 s svařovacího času pro kombinaci materiálů Makrolon AL 2447 a Apec 1895 černý

Tabulka 18: Výsledky vizuální kontroly pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý pro svařovací čas 3s

Makrolon AL2447 x Apec 1895 černý							
Svařovací čas: 3s							
Svařovací proud [A]	Šířka svaru [mm]	Výška svaru [mm]	Změna barvy (hnědnutí)	Pění svaru	Vnik prasklin	Vznik bublin (počet)	Hodnocení
7	0	0	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
7,5	0	0	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
8	0	0	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
8,5	0	0	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
9	9	1,8	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
9,5	9,4	1,9	Ne	Ne	Ne	1	OK
10	9,5	2,1	Ne	Ne	Ne	1	OK
10,5	9,7	2,1	Ne	Ne	Ne	1	OK
11	9,7	2,1	Ne	Ne	Ne	1	OK
11,5	9,8	2,1	Ne	Ne	Ne	1	OK
12	9,9	2,2	Ne	Ne	Ne	1	OK
12,5	9,9	2,2	Ne	Ne	Ne	1	OK
13	10,9	2,3	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
13,5	10,1	2,5	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
14	10,1	2,5	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
14,5	10,2	2,6	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
15	10,2	2,7	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
15,5	10,2	2,8	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
16	10,4	3,3	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
16,5	10,4	3,3	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
17	10,4	3,5	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK

V tabulce 19 jsou vyhodnoceny výsledky vizuální zkoušky pro kombinaci materiál Makrolon AL 2447 a Apec 1895 černý pro svařovací čas 4s. Pro tuto kontrolu voleny parametry svařovacího proudu od 7,5 do 13,5 A. Minimální svařovací proud, při kterém svar vznikl byl 9 A, při svařovacím proudu 12 A již svar pění a vykazuje změnu barvy, praskliny se ani v tomto případě neobjevily. Jako vyhovující byly hodnoceny svary, vytvořené svařovacím proudem od 10 do 11,5 A.

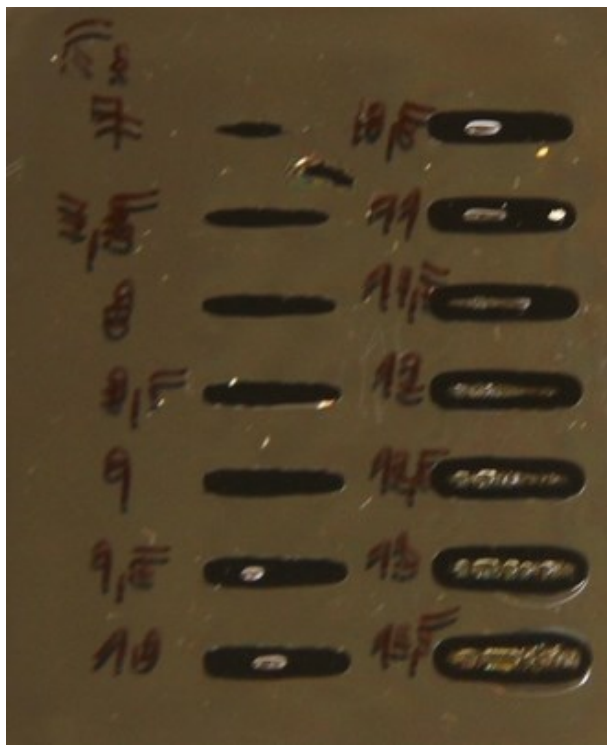


Obrázek 48. Vzorek pro vizuální kontrolu pro 4 s svařovacího času pro kombinaci materiálů Makrolon AL 2447 a Apec 1895 černý

Tabulka 19: Výsledky vizuální kontroly pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý pro svařovací čas 4s

Makrolon AL2447 x Apec 1895 černý							
Svařovací čas: 4s							
Svařovací proud [A]	Šířka svaru [mm]	Výška svaru [mm]	Změna barvy (hnědnutí)	Pění svaru	Vnik prasklin	Vznik bublin (počet)	Hodnocení
7	0	0	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
7,5	0	0	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
8	0	0	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
8,5	0	0	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
9	8,7	1,5	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
9,5	8,9	1,5	Ne	Ne	Ne	1	NOK
10	9,2	1,8	Ne	Ne	Ne	4	OK
10,5	9,5	2,2	Ne	Ne	Ne	2	OK
11	9,7	2,2	Ne	Ne	Ne	3	OK
11,5	9,9	2,4	Ne	Ne	Ne	1	OK
12	10	2,5	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
12,5	10	2,7	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
13	10,3	2,8	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
13,5	10,4	2,9	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK

V tabulce 20 jsou vyhodnoceny výsledky vizuální zkoušky pro kombinaci materiál Makrolon AL 2447 a Apec 1895 černý pro svařovací čas 5s. Pro tuto kontrolu voleny parametry svařovacího proudu od 7 do 13,5 A. Minimální svařovací proud, při kterém svar vznikl byl 7 A, při svařovacím proudu 11,5 A svar pěníl a začínal jevit známky změny barvy, bez prasklin. Jako vyhovující byly hodnoceny svary, vytvořené svařovacím proudem od 9,5 do 11 A



Obrázek 49. Vzorek pro vizuální kontrolu pro 5 s svařovacího času pro kombinaci materiálů Makrolon AL 2447 a Apec 1895 černý

Tabulka 20: *Výsledky vizuální kontroly pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý pro svařovací čas 5s*

Makrolon AL2447 x Apec 1895 černý							
Svařovací čas: 5s							
Svařovací proud [A]	Šířka svaru [mm]	Výška svaru [mm]	Změna barvy (hnědnutí)	Pění svaru	Vnik prasklin	Vznik bublin (počet)	Hodnocení
7	3,5	1,3	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
7,5	8,5	1,8	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
8	9	1,8	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
8,5	9,4	1,9	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
9	9,5	2	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
9,5	9,7	2,1	Ne	Ne	Ne	1	OK
10	9,7	2,2	Ne	Ne	Ne	1	OK
10,5	9,7	2,5	Ne	Ne	Ne	1	OK
11	9,9	2,5	Ne	Ne	Ne	1	OK
11,5	10	2,6	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
12	10,26	2,7	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
12,5	10,4	2,9	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
13	10,8	3,3	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
13,5	10,8	3,5	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK

V tabulce 21 jsou vyhodnoceny výsledky vizuální zkoušky pro kombinaci materiál Makrolon AL 2447 a Apec 1895 černý pro svařovací čas 6s. Pro tuto kontrolu voleny parametry svařovacího proudu od 6,5 do 12 A. Minimální svařovací proud, při kterém svar vznikl byl 7 A, při svařovacím proudu 10,5 A svar pění a začínal jevit známky změny barvy, bez prasklin. Jako vyhovující byly hodnoceny svary, vytvořené svařovacím proudem od 8,5 do 10 A



Obrázek 50. Vzorek pro vizuální kontrolu pro 6 s svařovacího času pro kombinaci materiálů Makrolon AL 2447 a Apec 1895 černý

Tabulka 21: Výsledky vizuální kontroly pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý pro svařovací čas 6s

Makrolon AL2447 x Apec 1895 černý							
Svařovací čas: 6s							
Svařovací proud [A]	Šířka svaru [mm]	Výška svaru [mm]	Změna barvy (hnědnutí)	Pění svař	Vnik prasklin	Vznik bublin (počet)	Hodnocení
6,5	0	0	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
7	6,2	1,4	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
7,5	9,1	1,9	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
8	9,3	2,1	Ne	Ne	Ne	Ne	NOK
8,5	9,4	2,2	Ne	Ne	Ne	1	NOK
9	9,5	2,4	Ne	Ne	Ne	1	OK
9,5	9,6	2,6	Ne	Ne	Ne	1	OK
10	9,6	2,8	Ne	Ne	Ne	1	OK
10,5	10	2,8	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
11	10,4	3	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
11,5	10,5	3,1	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK
12	10,6	3,4	Ano	Ano	Ne	Pění	NOK

7.2 Výsledky zkoušky smykem

V tabulkách 22 až 26 jsou uvedeny výsledky odtrhové zkoušky smykem pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 černý ve všech variantách zatížení vzorků.

Tabulka 22: *Výsledky zkoušky smykem pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 černý bez tepelného zatížení*

Makrolon AL 2447 + Apec 1895 černý -bez zatížení					
Svařovací čas [s]	2	3	4	5	6
Svařovací proud [A]	15	12	11,5	10,5	10
Odtrhová síla [N]	729	731	716	784	833

Tabulka 23: *Výsledky zkoušky smykem pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 černý po dlouhodobém tepelném zatížení 130°C*

Makrolon AL 2447 + Apec 1895 černý - dlouhodobé tepelné zatížení 130°C					
Svařovací čas [s]	2	3	4	5	6
Svařovací proud [A]	15	12	11,5	10,5	10
Odtrhová síla [N]	656	661	682	721	723

Tabulka 24: *Výsledky zkoušky smykem pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 černý po krátkodobém tepelném zatížení 130°C*

Makrolon AL 2447 + Apec 1895 černý - Krátkodobé tepelné zatížení 130°C					
Svařovací čas [s]	2	3	4	5	6
Svařovací proud [A]	15	12	11,5	10,5	10
Odtrhová síla [N]	684	689	757	764	819

Tabulka 25: *Výsledky zkoušky smykem pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 černý po krátkodobém tepelném zatížení 155°C*

Makrolon AL 2447 + Apec 1895 černý - Krátkodobé tepelné zatížení 155°C					
Svařovací čas [s]	2	3	4	5	6
Svařovací proud [A]	15	12	11,5	10,5	10
Odtrhová síla [N]	490	530	563	568	602

Tabulka 26: *Výsledky zkoušky smykem pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 černý po zatížení kondenzační vodou*

Makrolon AL 2447 + Apec 1895 černý - zatížení kondenzační vodou					
Svařovací čas [s]	2	3	4	5	6
Svařovací proud [A]	15	12	11,5	10,5	10
Odtrhová síla [N]	711	716	734	774	821

Odtrhové síly všech svarů bez zatížení vykazují nejvyšší hodnoty v porovnání s velikostí odtrhových sil vzorků s předešlým krátkodobým a dlouhodobým tepelným i vlhkostním zatížením pro jednotlivé svařovací proudy. Vlivem postupného zvyšování svařovacího proudu, docházelo k navyšování odtrhových sil svarů u všech svařených vzorků. Největšího vlivu na pevnost svaru bylo zjištěno u krátkodobého tepelného zatížení při teplotě 155°C. Krátkodobé i dlouhodobé tepelné zatížení při 130°C s ohledem na pevnost svaru nevykazovalo velké rozdíly. Jako nejmenší ovlivnění bylo vyhodnoceno zatížení kondenzační vodou. Celkově lze říci, že nejvyšších odtrhových sil bylo dosaženo při použití relativně delších svařovacích časů a nižších svařovacích proudů.

V tabulkách 27 až 31 jsou shrnuty výsledky odtrhové zkoušky na smyk pro kombinaci materiálů Makrolon AL 2447 a Apec 1895 Šedý.

Tabulka 27: *Výsledky zkoušky smykem pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý po zatížení kondenzační vodou*

Makrolon AL 2447 + Apec 1895 šedý - zatížení kondenzační vodou					
Svařovací čas [s]	2	3	4	5	6
Svařovací proud [A]	40	36	32	28	24
Odtrhová síla [N]	920	883	833	812	798

Tabulka 28: *Výsledky zkoušky smykem pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý bez tepelného zatížení*

Makrolon AL 2447 + Apec 1895 šedý - bez zatížení					
Svařovací čas [s]	2	3	4	5	6
Svařovací proud [A]	40	36	32	28	24
Odtrhová síla [N]	950	934	880	850	830

Tabulka 29: *Výsledky zkoušky smykem pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý po dlouhodobém tepelném zatížení 130°C*

Makrolon AL 2447 + Apec 1895 šedý - dlouhodobé tepelné zatížení 130°C					
Svařovací čas [s]	2	3	4	5	6
Svařovací proud [A]	40	36	32	28	24
Odtrhová síla [N]	795	770	735	697	683

Tabulka 30: *Výsledky zkoušky smykem pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 šedý po krátkodobém tepelném zatížení 155°C*

Makrolon AL 2447 + Apec 1895 šedý - krátkodobé tepelné zatížení 155°C					
Svařovací čas [s]	2	3	4	5	6
Svařovací proud [A]	40	36	32	28	24
Odtrhová síla [N]	610	598	508	480	438

Tabulka 31: *Výsledky zkoušky smykem pro kombinaci materiálů Makrolon AL2447 a Apec 1895 černý po krátkodobém tepelném zatížení 130°C*

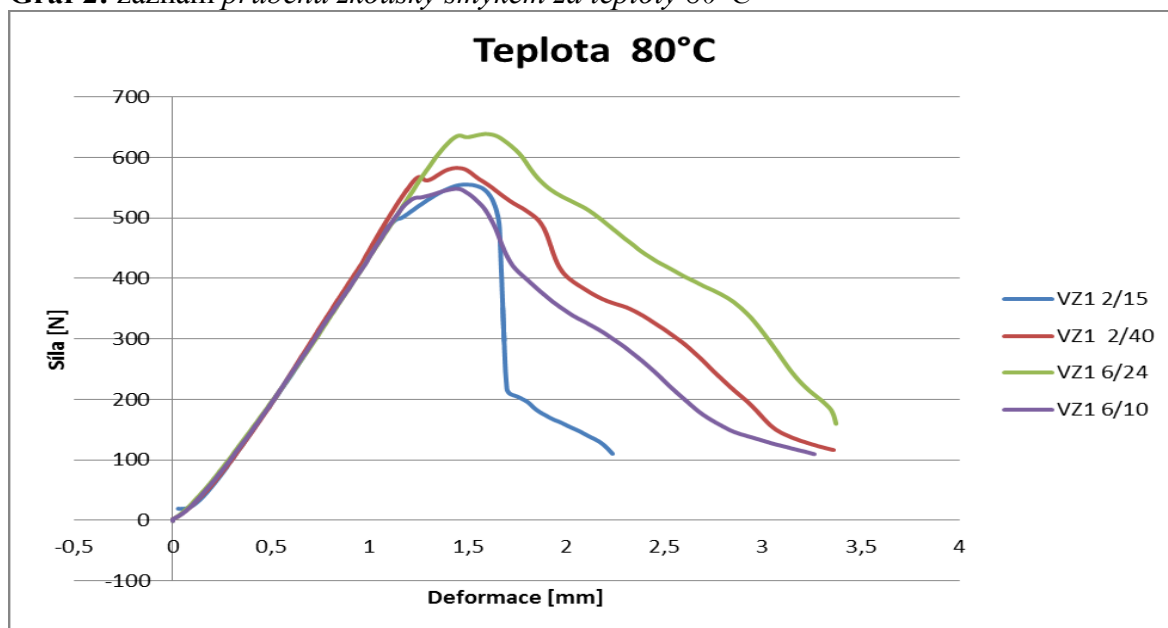
Makrolon AL 2447 + Apec 1895 šedý - krátkodobé tepelné zatížení 130°C					
Svařovací čas [s]	2	3	4	5	6
Svařovací proud [A]	40	36	32	28	24
Odtrhová síla [N]	910	869	778	750	720

Při odtrhové zkoušce bylo dosaženo nejvyšších hodnot ve skupině svarů, která nebyla nikterak ovlivněna. Naopak nejnižších hodnot dosahovaly vzorky zatížené teplotou 155°C po dobu 2 h. Vzorky po krátkodobém i dlouhodobém teplotním zatížení teplotou 130°C vykazovaly oproti skupině vzorků, která nebyla nijak ovlivněna, hodnoty nižší, avšak vyšší než vzorky ovlivněné teplotou 155°C. Nejmenšího vlivu na výslednou odtrhovou sílu, bylo zaznamenáno u skupiny vzorků ovlivněné kondenzační vodou.

7.3 Výsledky zkoušky za zvýšené teploty

V příložených grafech 2 až 5 je grafický záznam odtrhové zkoušky za okolní teploty 80°C, 95°C, 110°C a 130°C. V tabulkách 32 až 35 jsou zpracovány výsledky těchto zkoušek ve formě nejvyšších naměřených sil.

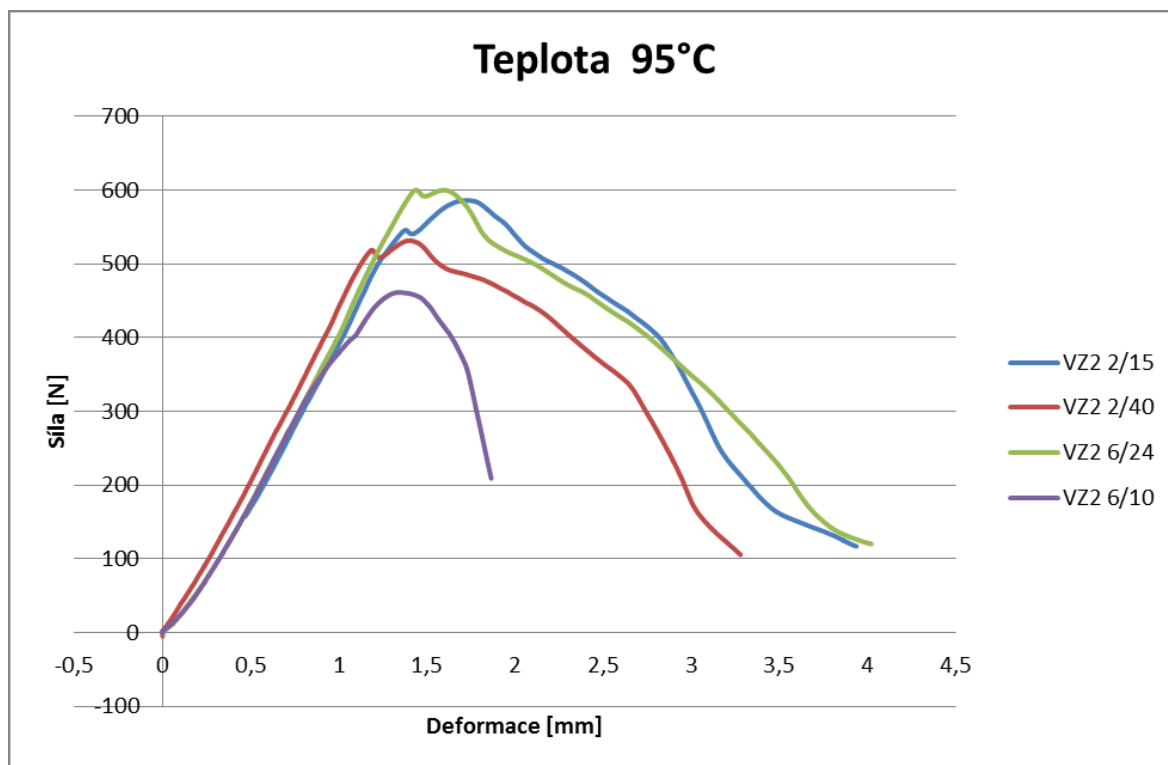
Graf 2: záznam průběhu zkoušky smykem za teploty 80°C



Tabulka 32: Výsledky zkoušky smykem za teploty 80°C

Teplota: 80°C		
Materiál	Makrolon AL 2447 + Apec 1895 černý	
Svařovací čas [s]	2	6
Svařovací proud [A]	15	10
Odtrhová síla [N]	555	548
Materiál	Makrolon AL 2447 + Apec 1895 šedý	
Svařovací čas [s]	2	6
Svařovací proud [A]	40	24
Odtrhová síla [N]	583	639

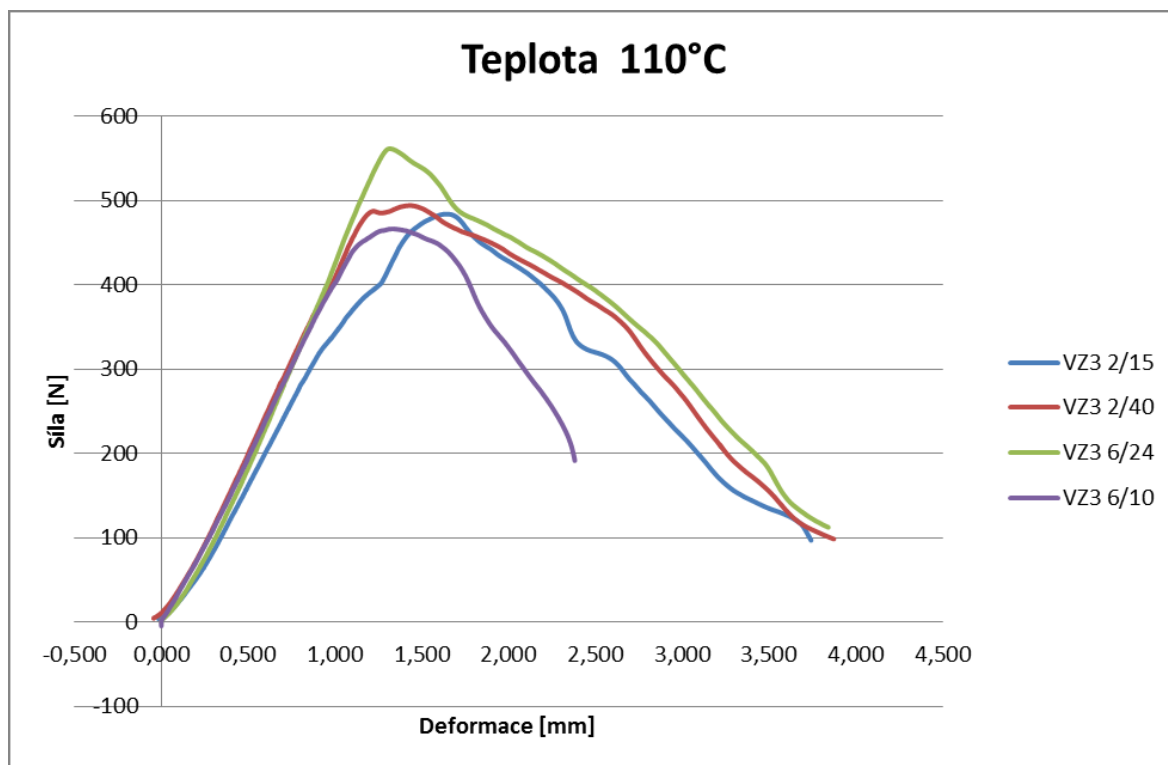
Graf 3: záznam průběhu zkoušky smykem za teploty 95°C



Tabulka 33: Výsledky zkoušky smykem za teploty 95°C

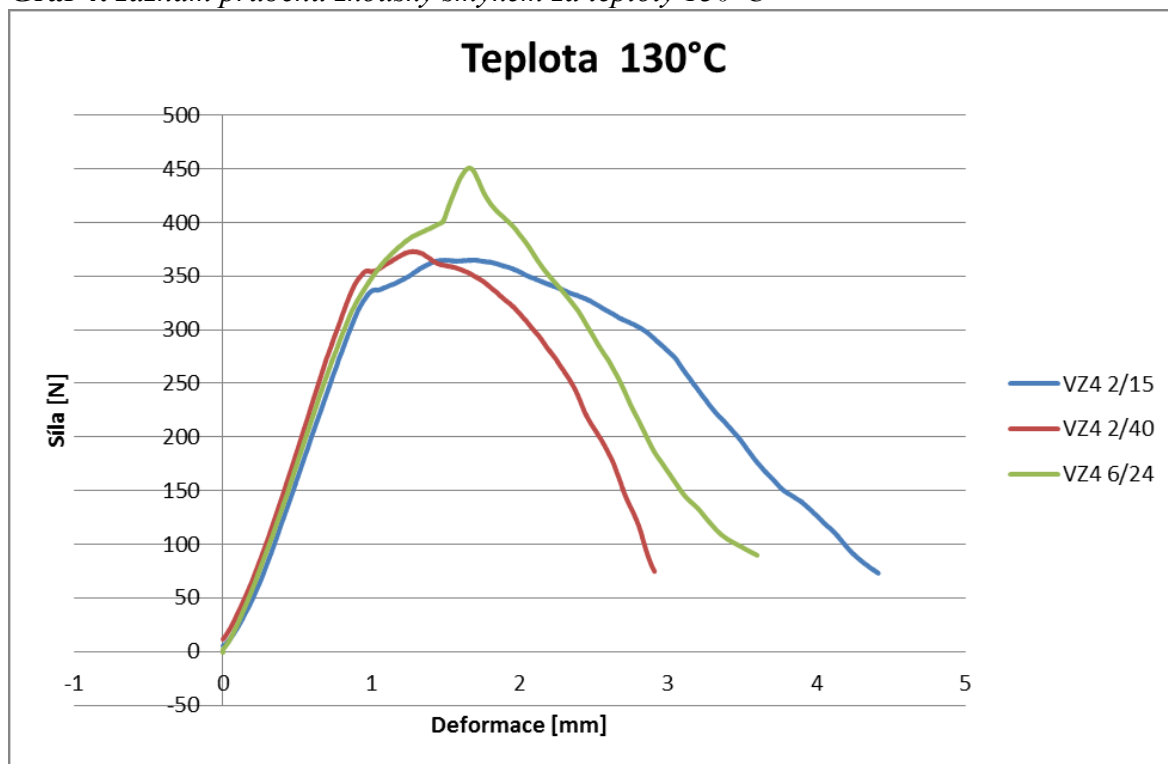
Teplota: 95°C		
Materiál	Makrolon AL 2447 + Apec 1895 černý	
Svařovací čas [s]	2	6
Svařovací proud [A]	15	10
Odtrhová síla [N]	586	461
Materiál	Makrolon AL 2447 + Apec 1895 šedý	
Svařovací čas [s]	2	6
Svařovací proud [A]	40	24
Odtrhová síla [N]	531	600

Graf 4: záznam průběhu zkoušky smykem za teploty 110°C



Tabulka 34: Výsledky zkoušky smykem za teploty 110°C

Teplota: 110°C		
Materiál	Makrolon AL 2447 + Apec 1895 černý	
Svařovací čas [s]	2	6
Svařovací proud [A]	15	10
Odtřhová síla [N]	484	466
Materiál	Makrolon AL 2447 + Apec 1895 šedý	
Svařovací čas [s]	2	6
Svařovací proud [A]	40	24
Odtřhová síla [N]	494	562

Graf 4: záznam průběhu zkoušky smykem za teploty 130°C**Tabulka 35:** Výsledky zkoušky smykem za teploty 130°C

Teplota: 130°C		
Materiál	Makrolon AL 2447 + Apec 1895 černý	
Svařovací čas [s]	2	6
Svařovací proud [A]	15	10
Odtrhová síla [N]	365	X
Materiál	Makrolon AL 2447 + Apec 1895 šedý	
Svařovací čas [s]	2	6
Svařovací proud [A]	40	24
Odtrhová síla [N]	373	451

Zkouškou pevnosti laserového sváru smykovým namáháním byly postupně podrobeny všechny svařené vzorky: transparentní polykarbonát Makrolon AL2447 x šedý polykarbonát APEC 1895 a transparentní polykarbonát Makrolon AL2447 x černý polykarbonát APEC 1895 při čtyřech různých teplotách (80°C, 95°C, 110°C, 130°C). Rychlost smykového namáhání byla 20 mm/min. Zahřátím vzorků docházelo při smykové zkoušce pravděpodobně k plastickým deformačním změnám v místě sváru, jejichž pevnost

se po dosažení maximální hodnoty postupně snižovala, jak je možné vyčíst z grafických záznamů u všech testovaných vzorků.

Z výsledných hodnot ve zpracovaných tabulkách, odečtených z grafických záznamů pro různé teploty vzorků, je patrný výrazný pokles maximálních dosažených hodnot v řádech stovek newtonů v rámci skupiny vzorků svařených stejnými svařovacími parametry. Mezi jednotlivými teplotami je patrný další faktor, a to snižující se maximální odtrhová síla s narůstající teplotou.

Při všech teplotách dosáhl nejvyšší pevnosti šedý vzorek při svařovacích parametrech 6s a 24 A.

8 Závěr

Tato diplomová práce se zabývá technologií transmisivního svařování termoplastů laserem, která je pro své výhody hojně využívána v automobilovém a elektrotechnickém průmyslu. Jako zkušební vzorky byly zvoleny desky z materiálů, které se používají pro výrobu komponentů hlavních světlometů a zadních skupinových světlů automobilů. Svařeny byly v zařízení, které se používá pro sériovou výrobu, což je jistě dobrým předpokladem pro získání výsledků, které následně budou moci být aplikovány do technické praxe.

Cílem práce bylo zhodnotit, do jaké míry ovlivňuje tepelné a vlhkostní zatížení pevnost svarů mezi transparentním polykarbonátem Makrolon AL2447 a absorpčním černým a šedým materiálem APEC 1895 svařeným laserovým paprskem, proto byly z tepelných simulací a reálných měření stanoveny tepelné zátěže, kterým byly vzorky vystaveny, a následně byla zjištěna síla potřebná pro roztržení svarového spoje. Experiment byl rozdělen na 2 části, z nichž první se věnovala zkoušení vzorku při pokojové teplotě po tepelné a vlhkostní expozici a druhá zkoušení parametrů svarového spoje za zvýšené teploty, což přineslo nový pohled na svařování termoplastů.

V první části experimentu bylo zjištěno, že tepelná expozice ovlivňuje v negativním slova smyslu pevnost spoje a bylo dokázáno, že spíše než doba expozice je pro pevnost svaru důležitější teplota, která na svarový spoj působí. V druhé části experimentu bylo zjištěno, že pevnost spoje se vzrůstající teplotou klesá, což bylo ověřeno při teplotách 80°C, 95°C, 110°C a 130°C.

V rámci těchto zkoušek byla jako vedlejší experiment provedena analýza závislosti parametrů svařování na výsledné pevnosti spoje a ověření možnosti svařování materiálu jiné než černé barvy, a tudíž s nižší absorpcí energie z laserového paprsku. Do současné doby byly ve společnosti HELLA jako absorpční materiály doporučovány pouze termoplasty v černém odstínu. Tento experiment však dokázal, že jiné než černé materiály je nejen možné s úspěchem svařovat, nýbrž dosahují i lepších pevnostních parametrů než materiály dosud užívané. Dalším pozitivním zjištěním bylo, že tyto materiály poskytují širší parametrické okno a tím činí proces robustnějším, což je velice důležité pro výrobu nejvyšší jakosti.

V rámci vedlejšího experimentu bylo zjištěno, že u černého materiálu je vhodnější, s ohledem na pevnost svarového spoje, používat kratší časy svařování, kompenzované relativně vyšším výkonem a naopak u šedého absorpčního materiálu používat delší svařovací časy, při užití relativně nižšího výkonu.

Pevně věřím, že všechny tyto výsledky se podaří zúročit při výrobě ve společnosti HELLA a závěry této práce pomohou zlepšit kvalitu výrobků, které budou později spolehlivě sloužit všem koncovým uživatelům.

Poděkování:

Rád bych touto na tomto místě poděkoval Ing. Vladislavu Ochodkovi za vedení této diplomové práce, poskytnuté rady a jeho pomoc, ochotu a čas, který věnoval konzultacím.

Dále bych rád poděkoval Ing. Jitce Brodinové, Ph.D. za motivaci a cenné rady z oblasti materiálů .

V neposlední řadě bych také rád poděkoval rodičům, za jejich podporu a pochopení během celé doby nelehkého studia .

SEZNAM LITERATURY

- [1] HONNER, Milan. Laserové technologie v průmyslu. *DPS - Plošné spoje od A do Z*. červenec/srpen 2011, č. 4, s. 42. Dostupné z:
http://laser.zcu.cz/files/pdf/laserove_technologie_v_prumyslu.pdf
- [2] ŠULC, Jan. Průmyslové aplikace laserových systémů. In: *PLS Laser Systems* [online]. 13.7.2004 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>
- [3] KERŠLÁGER, Milan. Laser. In: *Wikipedie* [online]. 25. 8. 2008, 5. 4. 2012 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Laser>
- [4] Lenfeld, P. Technologie spojování plastů. Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie, Oddělení tváření kovů a plastů. Kapitola 12.1.2. Svařování plastů. Dostupné z: [www.
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/12.htm)
- [5] BARTOŠ, Václav. *Optimalizace svařovacích parametrů pro technologii svařování laserem u vybraných termoplastů*. Zlín, 2009. Dostupné z:
http://dspace.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/8913/barto%C5%A1_2009_dp.pdf?sequence=1. Diplomová. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Libuše Sýkorová Ph.D., str. 13.
- [6] Ehrenstein, G.W. *Handbuch Kunstof - Verbindungstechnik*. 1st ed. Munchen: Carl Hanser Verlag, 2004. 690,710 p. ISBN 3-446-22340-1.
- [7] Laserové svařování plastů. *Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. 2005 [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/laserove-svarovani-plastu>
- [8] Informační materiály, Hella Autotechnik NOVA s.r.o., Česká republika, Duben 2011
- [9] Laser.zcu.cz [online]. 2005 [cit.2014-05-17]. Specifikace laserových zařízení. Dostupné z [www.
http://www.laser.zcu.cz/wiki/specifikace-laserovych-zarizeni](http://www.laser.zcu.cz/wiki/specifikace-laserovych-zarizeni)>.

[10] CVUT.cz: ul 12133.fsid,cvut.cz [online]. 2006 [cit. 2014-05-17]. Hodnocení kvality svarového spoje. Dostupné z www:

http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf.

[11] Konstrukční návody, postupy, Hella Autotechnik Nova s.r.o., Česká republika, Březen 2009.

[12]. Sova M., Krebs J., Termoplasty v praxi, svazek 1, Praha, VERLAG DASHOFER, Duben 2001, ISBN 80-86229-15-7.

[13] Mleziva J., Šňupárek J.: Polymery, Výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2 přepracované vydání, Praha 2000 Sobotáles, str. 168, ISBN 80-85920-72-7.

[14] Frick T., Hopfner M., Laser Welding of Thermoplastics: user handbook. 1 st ed. Erlangen: BLZ, 2007. 73 p. ISBN-10-3-9809601-1-7.

[15] Informační materiály firmy Titan-Multiplast, Přístroje pro kontrolu svárů. Dostupné z [www: http://www.titan-multiplast.cz/produkty/pristroje-pro-kontrolu-svaru-56/](http://www.titan-multiplast.cz/produkty/pristroje-pro-kontrolu-svaru-56/)

[16] BAYER MATERIALSCIENCE AG. *Makrolon® – the polycarbonate: Product range – typical values – properties – processing*. Leverkusen, 2007, 28 s. Dostupné z: www.bayermaterialscience.de ISBN 978 - 80 - 7318 - 596 – 1.

[17] L'. Kovačič, J. Bína. Plasty - vlastnosti, zpracování, využití. vyd. ALFA; v Bratislavě, 1974

[18] RYBA, Jakub. Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení. *Základní princip laseru a jejich dělení*. 2013. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>

[19] DUŠEK, Jiří. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. In: *Lasery* [online]. 2013 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>

[20] Hella-Norm N20120-03. Technical manufacturing design guideline - Laser welding of plastics. 1. vyd. Lippstadt: Hella, 2007.

[21] CO2 laser. *Wikipedia* [online]. 2013, 24. 3. 2013 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/CO2_laser

[22] KRUTINA, Jiří. LINTECH. *Využití laserů pro průmyslovou aplikaci: Nepublikovaný dokument*. Domažlice, 2014.

-
- [23] *Laser diode data sheet: LIMO Lissotschenko Mikrooptik*. Dortmund, Germany, 2014.
- [24] Laserové svařování plastů: Centrum laserových a automatizačních technologií. *Laserové svařování plastů* [online]. 2014 [cit. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/laserove-svarovani-plastu>
- [25] Lenfeld , P. Technologie spojování plastů. Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní, Katedra strojírenské technologie, Oddělení tváření kovů a plastů. Kapitola 12.1.4. Vstřikování plastů. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm